

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Měření optického vysílače pro vnitřní bezvláknové optické sítě  
založené na optických vláknech**

**The Measurement of Optical Transmitter Simulation for Indoor  
Free Space Optical Network Based on the Optical Fibers**

**2016**

**Jan Chavík**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Chavík**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: **Měření optického vysílače pro vnitřní bezvláknové optické sítě založené na optických vláknech**  
**The Measurement of Optical Transmitter Simulation for Indoor Free Space Optical Network Based on the Optical Fibers**

Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

Student nejdříve zkonstruuje optické vysílače na bázi optických vláken a poté bude testovat jejich vlastnosti. Pod vlastnostmi se bude mínit měření výkonových vlastností optických vysílačů v prostoru různě definované ploše v temné místnosti na RA302.

1. Studium a popis vnitřních bezvláknových sítí založených na použití optických vláken.
2. Zhotovení optických vysílačů pro měření.
3. Měření výkonových vlastností optických vysílačů na ploše.
4. Vyhodnocení naměřených výsledků.

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BARRY, John R. Wireless infrared communications. Boston: Kluwer Academic, 1994, 192 s. Kluwer international series in engineering and computer science, Springer. ISBN 978-0792394761.
- [2] RAMIREZ-INIGUEZ, Roberto, Sevia M. IDRUS a Ziran SUN. Optical wireless communications: IR for wireless connectivity. Boca Raton: CRC Press, 2008, 344 s. ISBN 08-493-7209-7.
- [3] SCHUBERT, Fred E. Light-emitting diodes. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2006, 422 s. ISBN 05-218-6538-7.
- [4] GFELLER, Fritz R. a Urs BAPST. Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation. Proceedings of the IEEE. 1979, roč. 67, č. 11, s. 1474-1486. ISSN 0018-9219.
- [5] WANG, Ke, Ampalavanapillai NIRMALATHAS, Christina LIM a Efstratios SKAFIDAS. High-speed duplex optical wireless communication system for indoor personal area networks. Optics Express. 2010, roč. 18, č. 24, s. 25199-25216. ISSN 1094-4087.
- [6] WANG, Ke, Ampalavanapillai NIRMALATHAS, Christina LIM a Efstratios SKAFIDAS. Gigabit optical wireless communication system for indoor applications. In: Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), 2010 Asia. Shanghai: IEEE, 2010, 453 - 454. ISBN 978-1-4244-7111-9.
- [7] WANG, Ke, Ampalavanapillai NIRMALATHAS, Christina LIM a Efstratios SKAFIDAS. High-Speed

Optical Wireless Communication System for Indoor Applications. IEEE Photonics Technology Letters. 2011, roč. 23, č. 8, s. 519-521. ISSN 1041-1135.

[8] WANG, Ke, Ampalavanapillai NIRMALATHAS, Christina LIM a Efstratios SKAFIDAS. 4x12.5 Gb/s WDM Optical Wireless Communication System for Indoor Applications. Journal of Lightwave Technology. 2011, roč. 29, č. 13, s. 1988-1996. ISSN 0733-8724.

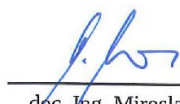
[9] IEEE 802.15.7. Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light. New York, USA: IEEE Computer Society, 2011.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Látal**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 29.04.2016



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 28. dubna 2016

  
.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval panu Ing. Janu Látalovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Bc. Danielu Hromulákovi za pomoc při vytváření, měření a zapisování hodnot. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat panu Ing. Alešovi Vanderkovi za pomoc při měření numerické apertury optických vláken a Ing. Jakubovi Čubíkovi za focení bakalářské práce a poskytnutí fotek.

## **Abstrakt**

Cílem této bakalářské práce je zkonstruovat optické vysílače na bázi optických vláken a následně otestovat jejich vlastnosti. Pod vlastnostmi se rozumí měření výkonových vlastností optických vysílačů v prostoru různě definované plochy v temné místnosti.

První část bakalářské práce se věnuje teoretické části týkající se vnitřních bezvláknových sítí, jejich rozdělení, porovnání výhod a nevýhod. Dále optickým čočkám a vadám, které u nich mohou vzniknout. Poslední teoretická část je zaměřena na optická vlákna, jejich rozdělení a jejich vlastností.

Druhá část bakalářské práce se zabývá praktickou částí. Nejprve se práce zabývá vytvářením polystyrenových přípravků pro měření. Princip jejich použití a využití je uskutečněn pro měření se 7 a 19 vlákny. Dále se zabývá vyrobením a nanášením čoček.

Třetí část se zabývá experimentálním měřením optického vysílače pro mnohovidové vlákno s parametry 50/125  $\mu\text{m}$ , 62,5/125  $\mu\text{m}$  a 105/125  $\mu\text{m}$ . Rozdíly při měření s čočkami a bez čoček a při měření 7 vláken a 19 vláken jsou patrné. Práce je zakončena zhodnocením rozdílů výkonových vlastností.

## **Klíčová slova**

Vnitřní bezvláknová optická síť; Komunikace viditelného světla; VLC; LED; Optické čočky; Optické vysílače pro vnitřní bezdrátové sítě; Přímá viditelnost LOS; Nepřímá viditelnost NON-LOS; Jednovidová optická vlákna SM; Mnohovidová optická vlákna MM; PDMS; Matlab;

## **Abstract**

The target of this bachelor thesis is to construct optical transmitters based on optical fibers and subsequently to test their qualities. By the qualities it is meant the measuring of performance qualities of optical transmitters in the space of differently defined surface in the darkroom.

The first part of the bachelor thesis deals with the theoretical part concerning indoor free space optical networks, their dividing, comparison of advantages and disadvantages, then optical lentils and defects, which can occur. The last theoretical part deals with optical fibers, their dividing and qualities.

The second part of the bachelor thesis concerns the practical part. At first, the thesis is focused on creation of polystyrene products for measuring. The principle of their usage and application is realized for measuring with 7 and 19 fibers. Then it concerns producing and application of lentils.

The third part deals with experimental measuring of the optical transmitter for multimode fiber with parameters 50/125  $\mu\text{m}$ , 62,5/125  $\mu\text{m}$  a 105/125  $\mu\text{m}$ . The differences during the measuring with and without lentils and during the measuring by 7 and 19 fibers are obvious. The thesis is ended by evaluation of differences of performance qualities.

## **Key words**

Indoor Free space optical network; visible light communication; VLC; LED; Optical lens; Optical transmitters for indoor free space optical network; Line of sight LOS; Non-line of sight NON-LOS; Single-mode optical fibre SM; Multi-mode optical fibre MM; PDMS; Matlab;

## Obsah

Seznam použitých symbolů.....	- 10 -
Seznam použitých zkratk.....	- 11 -
Seznam ilustrací a seznam tabulek.....	- 13 -
Úvod.....	15
1 Vnitřní bezvláknové optické sítě.....	16
1.1 VLC.....	16
1.2 VLC Modulace.....	17
1.3 Normy pro VLC .....	17
1.4 LED diody jako zdroj světla pro VLC .....	17
2 Optické vysílače pro bezvláknové sítě.....	20
2.1 Přímá viditelnost (LOS) .....	20
2.2 Nepřímá viditelnost (NON-LOS).....	20
3 Optické čočky.....	22
3.1 Spojné čočky .....	22
3.2 Rozptylné čočky.....	23
3.3 Speciální čočky .....	23
3.3.1 Fresnelova čočka .....	23
3.3.2 Asférická čočka .....	24
3.3.3 Toroidní čočka.....	24
3.3.4 Cylindrická čočka.....	24
3.3.5 Multifokální čočka .....	24
3.4 Vady čoček.....	24
3.4.1 Barevná vada (Chromatická aberace).....	24
3.4.2 Kulová vada (Sférická vada) .....	24
3.4.3 Koma .....	25
3.4.4 Zkreslení.....	25
3.5 Polydimetylsiloxan.....	26
4 Optická vlákna .....	27
4.1 Popis optických vláken .....	27
4.2 Numerická apertura.....	27
4.3 Dělení optických vláken.....	28
4.3.1 Jednovidová optická vlákna .....	28



4.3.2	Mnohovidová optická vlákna .....	29
4.3.3	Skokový index lomu .....	29
4.3.4	Gradientní index lomu (plynulá změna) .....	30
4.4	Vlastnosti optických vláken .....	30
4.4.1	Disperze .....	30
4.4.2	Vidová disperze .....	30
4.4.3	Útlum .....	32
4.4.4	Materiálová absorpce .....	32
4.4.5	Rozptyl .....	32
4.4.6	Ohybové ztráty .....	33
5	Praktická část .....	35
5.1	Úvod do měření optických vysílačů .....	35
5.2	Měření optických vysílačů na ploše .....	35
5.3	Konstrukce optických vysílačů .....	37
5.3.1	Úvod do konstrukce optických vláken .....	37
5.3.2	Konstrukce optických vysílačů pro 7 vláken .....	37
5.3.3	Konstrukce optických vysílačů pro 19 vláken .....	38
5.4	Výroba čoček .....	39
5.5	Středování optických vysílačů .....	40
6	Experimentální měření .....	41
6.1	Měření optického vysílače pro mnohovidové vlákno s parametry 50/125 $\mu\text{m}$ ....	41
6.1.1	Měření optického vysílače pro 7 vláken .....	41
6.1.2	Měření optického vysílače pro 19 vláken .....	43
6.2	Měření optického vysílače pro mnohovidové vlákno s parametry 62,5/125 $\mu\text{m}$ .	44
6.2.1	Měření optického vysílače pro 7 vláken .....	44
6.2.2	Měření optického vysílače pro 19 vláken .....	46
6.3	Měření optického vysílače pro mnohovidové vlákno s parametry 105/125 $\mu\text{m}$ ..	47
6.3.1	Měření optického vysílače pro 7 vláken .....	47
6.3.2	Měření optického vysílače pro 19 vláken .....	49
	Závěr .....	51
	Použitá literatura .....	52
	Seznam příloh .....	54

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
<b>A</b>	dB	Útlum
<b>a</b>	$dB \cdot km^{-1}$	Měrný útlum
<b>D</b>	$m^{-1}$	Optická mohutnost
<b>d</b>	m	Průměr vlákna
<b>E</b>	Lux	Intenzita osvětlení
<b>F</b>	m	Ohnisková vzdálenost
<b>I</b>	Ampér	Proud
<b>L</b>	km	Délka vlákna
<b>N</b>	-	Počet módů
<b><math>n_1</math></b>	-	Index lomu jádra
<b><math>n_2</math></b>	-	Index lomu pláště
<b>r</b>	m	Poloměr vlákna
<b>U</b>	Volt	Napětí
<b><math>\alpha_a</math></b>	°	Úhel navázání
<b><math>\alpha_c</math></b>	°	Mezní úhel šíření
<b><math>\lambda</math></b>	$\mu m$	Vlnová délka
<b><math>\Phi</math></b>	$m^{-1}$	Optická mohutnost

---

## Seznam použitých zkratk

<b>Zkratka</b>	<b>Anglický význam</b>	<b>Český význam</b>
<b>ASK</b>	Amplitude Shift Keying	Klíčování amplitudovým posunem
<b>CAP</b>	Carrier-less Amplitude and Phase modulation	Amplitudová a fázová modulace bez nosné vlny
<b>CSK</b>	Color Shift Keying	Klíčování změnou barev
<b>FSO</b>	Free Space Optics	Bezvláknová optika
<b>IR</b>	Infrared	Infračervené záření
<b>IrDa</b>	Infrared Data Association	Komunikační infračervený port
<b>ITS</b>	Intelligent Transport Systems	Inteligentní dopravní systémy
<b>LD</b>	Laser Diode	Laserová dioda
<b>LED</b>	Light-Emitting diode	Dioda emitující světlo
<b>LOS</b>	Line Of Sight	Přímá viditelnost
<b>MM</b>	Multi-Mode Optical Fiber	Multividové optické vlákno
<b>MMF GI</b>	Graded Index Multimode Fiber	Gradientní optické vlákno
<b>MMF SI</b>	Step Index Multimode Fiber	Vlákno se skokovou změnou lomu
<b>NA</b>	Numerical Aperture	Numerická apertura
<b>NON LOS</b>	Non-Light Of Sight	Nepřímá viditelnost
<b>NRZ</b>	Non Return to Zero	Bez návratu k nule
<b>OOK</b>	On-Off Keying	Klíčování zapnuto, vypnuto
<b>PDMS</b>	Polydimetylsiloxan	Polymer na křemíkové bázi
<b>QAM</b>	Quadrature-Amplitude Modulation	Kvadrurní - amplitudová modulace
<b>RGB</b>	Red-Green-Blue	Červená-zelená-modrá
<b>SM</b>	Single-Mode Optical Fiber	Jednovidové optické vlákno

## Seznam použitých zkratek

---

<b>Rx</b>	Receiver	Přijímač
<b>Tx</b>	Transmitter	Vysílač
<b>UV</b>	Ultra Violet	Ultrafialové
<b>VLC</b>	Visible Light Communication	Komunikace ve viditelném spektru
<b>VLP</b>	Visible Light Positioning	Určování polohy za pomoci viditelného světla
<b>VPPN</b>	Variable Pulse Position Modulation	Modulace s proměnou pozicí pulsu

---

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo obrázku	Název obrázku	Číslo stránky
<b>Obrázek 1.1</b>	Princip bílých LED zdrojů.....	18
<b>Obrázek 1.2</b>	Princip RGB LED zdrojů.....	19
<b>Obrázek 2.1</b>	Využití vnitřních optických bezvláknových sítí pomocí LOS .....	20
<b>Obrázek 2.2</b>	Využití vnitřních optických bezvláknových sítí pomocí NON-LOS.....	20
<b>Obrázek 3.1</b>	Tvary povrchu spojných čoček .....	22
<b>Obrázek 3.2</b>	Tvary povrchu rozptylných čoček.....	23
<b>Obrázek 3.3</b>	Porovnání Fresnelovi a obyčejné čočky .....	23
<b>Obrázek 3.4</b>	Barevná vada.....	24
<b>Obrázek 3.5</b>	Kulová vada.....	25
<b>Obrázek 3.6</b>	Koma .....	25
<b>Obrázek 3.7</b>	Možnosti zkreslení .....	25
<b>Obrázek 3.8</b>	Chemický vzorec Polydimetylsiloxanu .....	26
<b>Obrázek 4.1</b>	Složení mnohovidového (vlevo) a jednovidového (vpravo) vlákna.....	27
<b>Obrázek 4.2</b>	Navázání paprsku do optického vlákna .....	28
<b>Obrázek 4.3</b>	Šíření světla v jednovidovém vlákně.....	29
<b>Obrázek 4.4</b>	Šíření světla v mnohovidovém vlákně se skokovou změnou indexu lomu (MMF SI) .....	30
<b>Obrázek 4.5</b>	Šíření světla v mnohovidovém vlákně s gradientním průběhem indexu lomu (MMF GI) .....	30
<b>Obrázek 4.6</b>	Rozšíření výstupních impulsů vlivem disperze.....	30
<b>Obrázek 4.7</b>	Vznik disperze.....	31
<b>Obrázek 4.8</b>	Polarizační vidová disperze .....	32
<b>Obrázek 4.9</b>	Útlum optického vlákna.....	32
<b>Obrázek 4.10</b>	Rayleighův rozptyl.....	33
<b>Obrázek 4.11</b>	Mikroohybové ztráty.....	34
<b>Obrázek 4.12</b>	Makroohybové ztráty.....	34
<b>Obrázek 5.1</b>	Použité přístroje .....	35
<b>Obrázek 5.2</b>	Plocha 1/8 koule.....	36
<b>Obrázek 5.3</b>	Souřadnicový systém .....	36
<b>Obrázek 5.4</b>	Vyznačení těžnic na 1/8 koule.....	37
<b>Obrázek 5.5</b>	Optický vysílač vytvořený ze 7 optických vláken .....	38
<b>Obrázek 5.6</b>	Optický vysílač vytvořený ze 19 optických vláken .....	38
<b>Obrázek 5.7</b>	Laboratorní vybavení pro výrobu čoček.....	39
<b>Obrázek 5.8</b>	Nanášení čočky (polydimetylsiloxanu) pod mikroskopem.....	39
<b>Obrázek 5.9</b>	Ukázka středování optických vláken pomocí laserové diody.....	40
<b>Obrázek 6.1</b>	Měření 7 vláken bez čoček (vlevo) a 7 vláken s čočkami (vpravo) pro 50/125 $\mu$ m .....	41
<b>Obrázek 6.2</b>	Relativní vyhodnocení naměřených hodnot pro 7 vláken s čočkami a bez čoček pro 50/125 $\mu$ m .....	42
<b>Obrázek 6.3</b>	Absolutní vyhodnocení naměřených hodnot pro 7 vláken s čočkami a bez čoček pro 50/125 $\mu$ m .....	42
<b>Obrázek 6.4</b>	Měření 19 vláken bez čoček (vlevo) a 19 vláken s čočkami (vpravo) pro 50/125 $\mu$ m .....	43

<b>Obrázek 6.5</b> Relativní vyhodnocení naměřených hodnot pro 19 vláken s čočkami a bez čoček pro 50/125 $\mu$ m .....	43
<b>Obrázek 6.6</b> Absolutní vyhodnocení naměřených hodnot pro 19 vláken s čočkami a bez čoček pro 50/125 $\mu$ m .....	44
<b>Obrázek 6.7</b> Měření 7 vláken bez čoček (vlevo) a 7 vláken s čočkami (vpravo) pro 62,5/125 $\mu$ m .....	44
<b>Obrázek 6.8</b> Relativní vyhodnocení naměřených hodnot pro 7 vláken s čočkami a bez čoček pro 62,5/125 $\mu$ m .....	45
<b>Obrázek 6.9</b> Absolutní vyhodnocení naměřených hodnot pro 7 vláken s čočkami a bez čoček pro 62,5/125 $\mu$ m .....	45
<b>Obrázek 6.10</b> Měření 19 vláken bez čoček (vlevo) a 19 vláken s čočkami (vpravo) pro 62,5/125 $\mu$ m .....	46
<b>Obrázek 6.11</b> Relativní vyhodnocení naměřených hodnot pro 19 vláken s čočkami a bez čoček pro 62,5/125 $\mu$ m .....	46
<b>Obrázek 6.12</b> Absolutní vyhodnocení naměřených hodnot pro 19 vláken s čočkami a bez čoček pro 62,5/125 $\mu$ m .....	47
<b>Obrázek 6.13</b> Měření 7 vláken bez čoček pro 105/125 $\mu$ m .....	47
<b>Obrázek 6.14</b> Relativní vyhodnocení naměřených hodnot pro 7 vláken s čočkami a bez čoček pro 105/125 $\mu$ m .....	48
<b>Obrázek 6.15</b> Absolutní vyhodnocení naměřených hodnot pro 7 vláken s čočkami a bez čoček pro 105/125 $\mu$ m .....	48
<b>Obrázek 6.16</b> Měření 19 vláken bez čoček pro 105/125 $\mu$ m .....	49
<b>Obrázek 6.17</b> Relativní vyhodnocení naměřených hodnot pro 19 vláken s čočkami a bez čoček pro 105/125 $\mu$ m .....	49
<b>Obrázek 6.18</b> Absolutní vyhodnocení naměřených hodnot pro 19 vláken s čočkami a bez čoček pro 105/125 $\mu$ m .....	50

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
<b>Tabulka 1.1</b>	Porovnání LED a laserových diod .....	18

## Úvod

Bezvláknové systémy a sítě se zabývají výzkumem bezvláknových spojů, a to jak venkovních, tak vnitřních. V dnešní době je zcela běžný přenos dat pomocí světelných paprsků. Optická vlákna se dnes využívají na celé Zemi, například tvoří páteřní spoje sítě Internet. Mezi další systémy patří, právě bezvláknová optika (Free Space Optics, FSO), která se využívá k přenosu paprsku volným prostorem.

Bezvláknová optika způsobuje v posledních letech velký rozruch. Bezvláknové optické spoje mají mnoho výhod oproti jiným bezdrátovým přenosům. Mezi hlavní výhody patří rychlost datových spojů a také přenosové pásmo, které je v dnešní době k dispozici. Náš městský provoz je už přeplněn rádiovými vlnami a tak nezůstává moc volných použitelných pásem. Z tohoto důvodu telekomunikační úřady dávají omezení. Na druhou stranu optické spoje nezamořují okolí, protože pracují s velmi úzkým světelným paprskem a viditelnými frekvencemi. Další výhody jsou například, že nejsou řízeny ani zpoplatňovány.

Přijímače i vysílače mají jeden smysl, který je zlepšit práci světelného zářiče (detektoru). Pro vysílače je potřebný specifický zdroj světla. Musí mít dostatečný výkon, aby dosvítil na určenou vzdálenost, a přitom se musí dobře modulovat, aby bylo dosaženo potřebné přenosové rychlosti. V posledních několika letech se tyto světelné zdroje velmi silně vyvíjely, nejčastější použití je pomocí laserové diody nebo LED diody. Vysílané světlo je u vysílače potřeba rozptýlit do větší plochy. Pro rozptýlení laseru je třeba rozšiřovač svazku, který úzký rovnoběžný paprsek rozptýlí do potřebné šířky. Pro rozptýlení světla u LED diody se používá čočka. U přijímače se můžeme využít kromě spojky ještě optický filtr. Filtr propouští k fotodiodě jen úzké spektrum vlnových délek a odstraňuje optický šum. [1]

V této práci se zabývám tím, jak moc se rozloží vysílané světlo při použití čoček oproti použití bez nich na ploše.

# 1 Vnitřní bezvláknové optické sítě

## 1.1 VLC

Komunikace viditelného světla (VLC) se označuje komunikační technologie, která využívá viditelný světelný zdroj jako vysílač signálu, vzduch jako přenosové médium, ať už se jedná o vnitřní nebo venkovní použití a vhodnou fotodiodu jako přijímací signál komponentu. VLC technologie má krátkou historii ve srovnání s jinými komunikačními technologiemi, například veřejně stará telefonní služba, Ethernet, vysokorychlostní optická komunikace, bezdrátové mobilní komunikace, IrDA, a další.

V současné době jsou výzkumy na VLC zaměřeny na použití v interiérech. Vnitřní VLC kanály jsou klasifikovány a převzaty z IR komunikace (Kahn, 1999) a (Ramirez-Iniguez, 2008), neboť konfigurace odkazů na VLC jsou podobné IR komunikaci. Rozdílné vlastnosti pocházejí z jiné pracovní vlnové délky a závislé vlnové délky zařízení (viditelné LED, křemík a další), a skutečnost, že VLC má duální povahy komunikace a osvětlení. Mezi další fyzikální principy vztahující se k optice mohou být použity podobně, včetně přenosu světla a odrazů. Je to způsobeno tím, že vývoj a komercializace diod (LED), které vyzařují světlo ve viditelné oblasti vlnových délek, byly úspěšně pro osvětlení v nedávném desetiletí. Říká se, že osvětlení LED nahradí konvenční osvětlení, jako jsou žárovky a zářivky protože mají charakteristiky dlouhé životnosti, rychlé přepínání a další. [5]

Pokud bychom se snažili, přenášet rádiové frekvence, jsou nutné antény a komplexní přijímače. Na druhou stranu je VLC jednodušší a používá jednoduché modulační metody podobné těm, které používají nízkonákladová IR zařízení (dálková ovládání). IR komunikace má výkonová omezení kvůli možnosti poškození zraku, zatímco pomocí LED světél můžeme dosáhnout vysokých rychlostí s vysokou intenzitou. [3].

Mezi rozvíjející se aplikace, které používají VLC patří:

- a) vnitřní komunikaci, jako je WiFi a mobilní bezdrátové komunikace
- b) komunikace bezdrátových spojů pro internet
- c) komunikační systémy jako součást inteligentních dopravních systémů (ITS)
- d) bezdrátové komunikační systémy v nemocnicích
- f) poskytování dynamických reklamních informací prostřednictvím chytrý telefon, fotoaparát.

Komunikace pomocí VLC se ve vnitřním prostředí stává nutností, protože mnozí lidé v dnešní době nosí více než jedno bezdrátové zařízení, například chytrý telefon, tablet, chytré hodinky, počítač, a zároveň požadovaná rychlost přenosu dat z každého zařízení roste exponenciálně. [2]

VLC je se používá především pro osvětlení prostor a přenos dat ve vnitřním využití, může být ovšem využita i pro venkovní aplikace. LED diody využívané v městském osvětlení, je každá lampa potencionální vysílač, což vede k využití veřejného osvětlení pro přenos dat. VLC by bylo možné využít i v dopravě jako protikolizní opatření, jelikož některé automobily jsou vybaveny LED světlomety, například. Automobil by brzdovými světly poslal zprávu, což by mělo za následek včasné reagování vozidla jedoucí za ním. Dále by VLC mohlo být využíváno k vysílání informací o dopravní situaci pomocí semaforů. Další využití je VLC pro určení polohy, neboli VLP (Visible Light Positioning) pro navigaci uvnitř velkých budov, například v nemocnicích, nebo k navigaci nevidomých osob. [3]



## 1.2 VLC Modulace

Nejčastěji používaná modulace se nazývá OOK (On-Of Keying) bez návratu k nule (NRZ- Non-Return to Zero), což je nejjednodušší amplitudová modulace (ASK – Amplitude Shift Keying). Další, méně používané modulace se nazývají VPPM (Variable Pulse Position Modulation), což je modulační schéma přizpůsobené pro stmívání světla pomocí šířky pulsu, který má vždy stejnou amplitudu. a CSK (Color-Shift Keying), která podporuje pouze VLC při použití vícebarevných zdrojů a detektorů, protože moduluje informaci mícháním barev. Tyto modulace mají specifikaci ve standardu IEEE 802.15.7. Lze však využít i další modulace, jako je například kvadrurní amplitudová modulace (QAM – Quadrature Amplitude Modulation), CAP modulace (Carrier-less Amplitude and Phase modulation) a další. Každá modulace musí splňovat určité požadavky. [3]

## 1.3 Normy pro VLC

IEEE definuje nový standard, IEEE 802.15.7, který popisuje vysokou rychlost přenosu dat VLC, až 96 Mb/s, a rychlé modulace optických světelných zdrojů. Standard IEEE 802.15.7 udává přenosovou rychlost dostačující pro uspokojení audio a video služeb a také hledí na šum a interferenci z okolního světla. Také udává rychlost blikání zářičů a platné oční bezpečnostní předpisy. Účelem vytváření těchto norem je vytvoření celosvětového standardu pro krátké bezdrátové optické komunikace, které vyžívají nelicencované pásmo. To má samozřejmě dopad na dnešní trh okolo LED, který je vhodný na využití ve VLC a otevírá dveře komunitě, která plánuje vyvíjet produkty, které budou v souladu s mezinárodní normou. Jako další důvod vytváření světového standardu je zajištění kompatibility, tedy spolupráce s jinými zařízeními a definice vlastnosti produktu. [2]

## 1.4 LED diody jako zdroj světla pro VLC

Pro vnitřní optický bezdrátový vysílač, jsou laserové diody vhodnější než LED diody, protože mají vyšší optické výkony, širší modulace pásma a charakteristiky pro převod lineárního elektrického signálu na optický. Linearita v konverzi signálu je obzvláště důležitá, když se používají sofistikovaná modulační schémata, jako jsou pomocné nosné modulace nebo víceúrovňové signalizace.

Z bezpečnostních důvodů (bezpečnost oka) se laserová dioda nemůže použít přímo pro vnitřní IR systémy, kde zařízení může vstoupit do lidského oka poměrně snadno. Laserové diody jsou vysoce směrové zdroje záření, a mohou přenést velmi vysoký výkon v malém prostoru na straně sítnice, což má za následek trvalou slepotu.

Na druhé straně jsou LED diody velkoplošné zářiče a tak mohou být bezpečně provozovány při relativně vyšší cíle. Jsou také levnější a spolehlivější. V důsledku toho, LED diody jsou přednostní zdroj světla pro většinu vnitřní použití. Nicméně, LED diody nelze použít nad 100Mbps v důsledku omezení stanovených mechanismy, které vyzařují světlo, zatímco laserové diody mohou být použity pro přenos na bitové rychlosti v řádech několika Gb. [8]

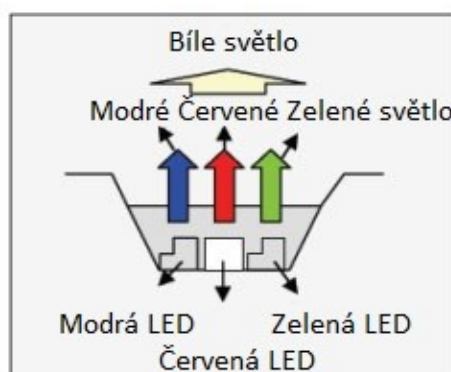
**Tabulka 1.1** Porovnání LED a laserových diod

Charakteristika	LED diody	Laserové diody
Spektrální šířka	25 – 100nm (10 – 50 THz)	$< 10^{-5}$ – 5 nm ( $< 1$ MHz – 2MHz)
Modulace šířky pásma	10 KHz – 10 Mhz	10 KHz – 10 Mhz
Účinnost přeměny	10 – 20%	30 – 70%
Bezpečnost oka	Považován za bezpečný	Musí být zajištěny, obzvláště pro $\lambda < 1400$ nm
Cena	Nízká	Střední až vysoká

Existují dva hlavní způsoby, jak vytvořit bílé světlo pomocí LED diod. První typ je tvořen bílou diodou. Obsahuje tři světelné zdroje (modrá, zelená, červená), které jsou dodávány ve správném poměru. Tato metoda je složitější a dražší, ale umožňuje vytvářet jakékoliv jiné barvy (Obrázek 1.1). VLC potřebuje výkonné LED diody pro dostatečné pokrytí požadovaného prostoru světlem. [4]

Červená, zelená a modrá LED dioda emituje pásmo spektra v závislosti na materiálu systému. Vlnová délka červené LED diody emituje kolem 625nm, zelená LED dioda emituje kolem 525nm a modré LED diody okolo 470nm. Výstupní optický výkon závisí na okolní teplotě.

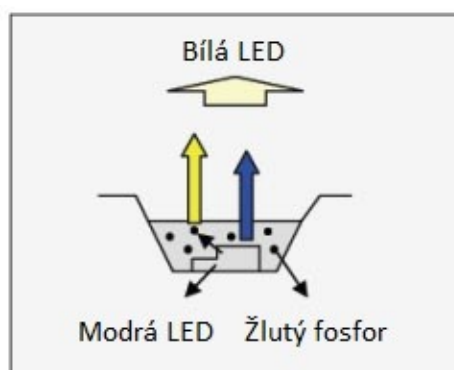
V závislosti na materiálu se teplotní závislost výstupního optického výkonu mění. Obecně platí, že se zvyšující se teplotou, výstupní optický výkon klesá. [5]

**Obrázek 1.1** Princip bílých LED zdrojů

Druhý typ bílých LED diod se skládá z modrého světla emitující čip. Část modrého světla rozruší žlutý fosfor (Yttrium Aluminium Garnet Y3Al5O12), který vytváří žluté světlo. Míchání modrého a žlutého světla vytvoří bílé světlo (Obrázek 1.2). Modulační rychlost je omezena pomalou odezvou fosforu. Tato metoda je jednodušší a levnější.

Na druhou stranu, bílá LED přitahuje pozornost pro osvětlovací zařízení. Srovnáme-li LED osvětlení s konvenčním osvětlením, například fluorescenční svítidla a žárovky, LED osvětlení má

mnoho výhod jako je vysoká účinnost, šetrný k životnímu prostředí, design, flexibilita, dlouhá životnost a lepší výkonové spektrum. [5]



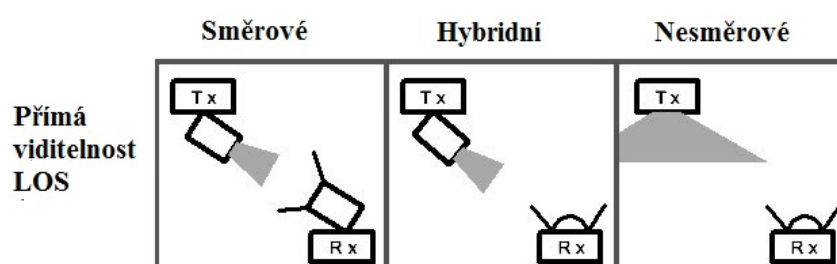
**Obrázek 1.2** *Princip RGB LED zdrojů*

## 2 Optické vysílače pro bezvláknové sítě

Existují dva hlavní typy vnitřních optických bezvláknových komunikačních systémů. Prvním typ se nazývá přímá viditelnost (LOS) systému (Obrázek 2.1) a druhý typ se nazývá nepřímá viditelnost (NON-LOS) systému (Obrázek 2. 2). [7]

### 2.1 Přímá viditelnost (LOS)

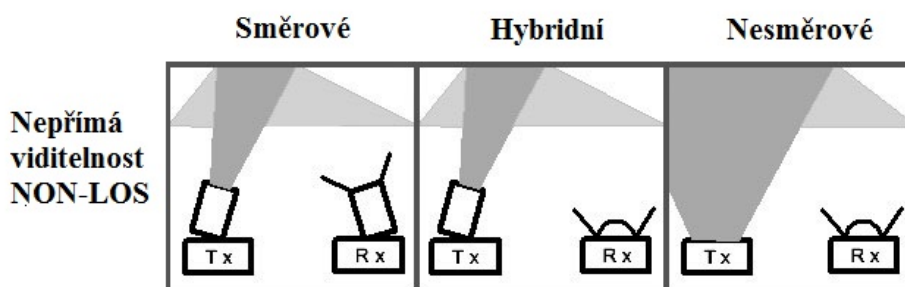
LOS systémy využívají vysokou směrovost vysílače a přijímače. LOS systém maximalizuje energetickou účinnost a minimalizuje mnohocestné zkreslení. Výkon se spoléhá na existenci nepřetržité cesty mezi vysílačem a přijímačem. Hlavní nevýhodou je nedostatek mobility a náchylnost k blokování. Optické zdroje musí mít zabezpečení oka třídy 1. Tyto typy se používají pro aplikace, ve kterých jsou svorky relativně pevné, jako jsou stolní počítače v kanceláři a IrDA. [7]



Obrázek 2.1 Využití vnitřních optických bezvláknových sítí pomocí LOS

### 2.2 Nepřímá viditelnost (NON-LOS)

Největší robustnost a snadnost použití je dosaženo použitím nepřímé viditelnosti systému, který je často označován jako difuzní systém. Nicméně difuzní systémy mají vyšší ztráty než jejich protějšky LOS, které vyžadují vyšší výkon vysílače a přijímače a mají velkou světelnou sběrnou plochu. Tento typ překonává problém blokování, opírá se o vysokou odrazivost běžných stavebních materiálů, tak, že významná část přijímaného signálu přichází na přijímač z různých úhlů. Je velmi flexibilní, nicméně přenosová rychlost, která může být dosažena, může být o mnoho menší než systémy LOS. Kromě toho optické ztráty v difuzním systému jsou mnohem větší než u LOS systémů. [7]



Obrázek 2.2 Využití vnitřních optických bezvláknových sítí pomocí NON-LOS

Existují dvě omezení pro difuzní systémy. Optický výkon musí být dostatečně velký, aby pokryl celý objem, a mnohocestný rozptyl omezuje rychlost přenosu dat. Mnohocestné šíření způsobuje, že šíření vysílaného impulsu, který může vyústit ve ztrátu amplitudy pulsu a vzájemného rušení symbolů.

Důvodem je maximální přenosová rychlost, která je závislá na koeficientech velikosti místnosti a reflexe uvnitř místnosti. [7]

Způsob nepřímé viditelnosti systému, paprsku umožňuje systému pracovat, i když jsou umístěny bariéry mezi vysílači a přijímači a je schopen poskytnout mobilitu pro předplatitele. Nicméně je nevýhoda v neúčinném využívání přenášeného výkonu a vícecestné disperze. Tyto nevýhody mohou být překonány přímým přístupem LOS systémů. To je více účinné při spotřebě energie a vícecestné minimalizace disperze, což vede k vyšší rychlosti přenosu dat. Jeho nevýhody je nehybnost vysílačů, přerušení přenosu způsobené stínováním. [6]

### 3 Optické čočky

Čočky jsou jedním z nejdůležitějších optických přístrojů. Čočka je v zásadě optická soustava, kterou tvoří dvě centrované plochy. Čočky bývají obvykle kulové, což znamená, že minimálně jeden povrch je tvořen kulovou plochou. V některých případech je možné použít čočky jiných tvarů.

Může být tvořena z libovolného průhledného materiálu, který lze vytvarovat do daných ploch. Nejčastěji se používají v optice a mají vliv na šíření světelného, infračerveného a ultrafialového záření. Tyto části elektromagnetického spektra však lidské oko není schopno rozpoznat. Nejčastějším materiálem pro výrobu čoček je čiré sklo, i když v dnešní době se pro jejich výrobu používají plasty a jiné materiály.

Materiál čočky v optice charakterizujeme absolutním indexem lomu  $n$ , který nám vyjadřuje poměr mezi rychlostí šíření světla ve vakuu a v daném materiálu čočky. Jelikož se v látce šíří světlo pomaleji díky interakci s materiálem, tak musí být index lomu materiálu čočky větší než jedna. Další charakteristikou je index absorpce, který udává míru útlumu světla v dané látce jeho absorpcí. Čočkou tedy neprochází veškeré světlo, ale jenom jeho část. Obecně můžeme říci, že absorpce světla uvnitř čočky je poměrně malá a blíží se nule.

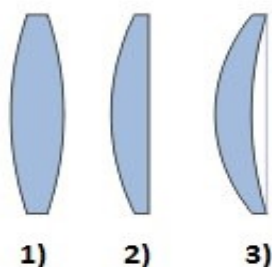
Rozeznáváme dva druhy čoček. První druh se nazývá konvergující (spojné) čočky. Druhým typem jsou rozbíhající (rozptylné) čočky. [10]

#### 3.1 Spojné čočky

Spojné čočky, také nazývané jako spojky mění rovnoběžný svazek na sbíhavý, tím vzniká za čočkou bod nazývaný jako ohnisko, ve kterém se tyto paprsky protínají (spojují). Tyto čočky jsou silnější ve středu než na okrajích. Ohnisková vzdálenost a optická mohutnost spojek je kladná. [10]

**Podle tvaru druhého povrchu je můžeme rozdělit (Obrázek 3. 1).:**

- 1) dvojevypuklá - u této čočky je druhý povrch vypuklý
- 2) ploskovypuklá - u této čočky je druhý povrch rovinný
- 3) dutovypuklé - u této čočky je druhý povrch dutý



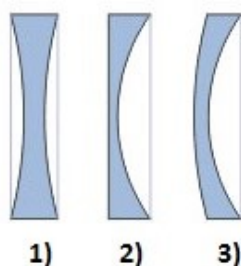
**Obrázek 3.1** Tvary povrchu spojných čoček

### 3.2 Rozptylné čočky

Tloušťka rozptylných čoček je uprostřed tenčí než na okrajích a jejich povrch je dutý. U rozptylných čoček se paprsky po průchodu čočkou rozptylují. [10]

**Podle tvaru druhého povrchu je můžeme rozdělit (Obrázek 3. 2).:**

- 1) dvojduté - u této čočky je druhý povrch dutý
- 2) ploskoduté - u této čočky je druhý povrch rovinný
- 3) vypukloduté - u této čočky je druhý povrch vypuklý



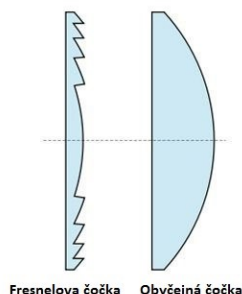
**Obrázek 3.2** Tvary povrchu rozptylných čoček

### 3.3 Speciální čočky

Speciální čočky jsou čočky, u kterých je tvar povrchu jiný než kulový. Do těchto čoček můžeme zařadit například: Fresnelova čočka, Asférická čočka, Toroidní čočka, Cylindrická čočka, Multifokální čočka. [7]

#### 3.3.1 Fresnelova čočka

Fresnelova čočka se vyznačuje jemně vroubkovaným povrchem. Jako materiál se používá sklo, ale může být použit i například plast. Výhodou Fresnelovy čočky oproti obyčejným čočkám je nižší hmotnost při zachování stejných parametrů. Snížení hmotnosti bylo dosaženo tak, že z původní dvojvypuklé čočky se zachovaly pouze ty části, které mění směr chodu světelných paprsků (části, ve kterých nastává lom světla). Původně byla vyvinuta pro námořní majáky, ale využívá se i například: Infračervená čidla pohybu, semaforey, divadelní, filmové a vojenské světlomety (Obrázek 3. 3). [10]



**Obrázek 3.3** Porovnání Fresnelovi a obyčejné čočky

### 3.3.2 Asférická čočka

Asférická čočka se vyznačuje tím, že je rotačně symetrická, ale má jiný tvar než kulový. Tyto tvary umožnily konstrukce nových fotografických objektivů a astronomických přístrojů. [10]

### 3.3.3 Toroidní čočka

Toroidní čočka má dvě navzájem kolmé roviny a na nich jiné zakřivení, takže v každé z rovin ovlivňuje sbíhavost paprsků jinak. Používá se pro korekci astigmatismu. [10]

### 3.3.4 Cylindrická čočka

Cylindrická čočka neboli nazývaná také válcová má alespoň jeden povrch tvořen částí válce. Tato čočka ovlivňuje chod paprsků v kolmé rovině na osu tohoto válce. Sbíhavost není ovlivněna v rovině určené směrem paprsku a osou válce. Nejčastější je korekce některých vad zraku. [10]

### 3.3.5 Multifokální čočka

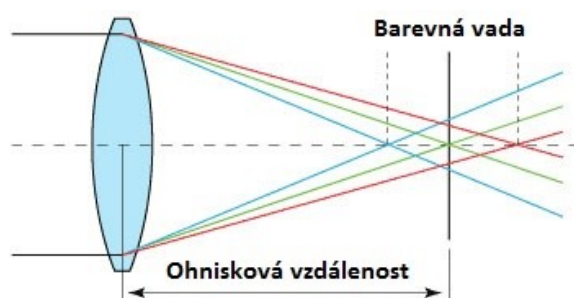
Multifokální čočka má různou ohniskovou vzdálenost v různých místech. Používá se například pro multifokální brýle. [10]

## 3.4 Vady čoček

U reálných čoček dochází v praxi při zobrazení k vadám:

### 3.4.1 Barevná vada (Chromatická aberace)

Barevná vada vzniká na základě různého indexu lomu pro různé barvy a různé vlnové délky světla. Největší rozdíl je mezi barvami z opačných konců spektru, tedy červená a modrá. Platí, že modré světlo se díky většímu lomu láme více než červené světlo. Odstranění barevné vady lze řešit pomocí speciálních optických prvků. Objektivy, které mají barevnou vadu téměř odstraněnou, nazýváme apochromáty (Obrázek 3. 4). [10]



Obrázek 3.4 Barevná vada

### 3.4.2 Kulová vada (Sférická vada)

Nazývaná též kulová nebo otvorová je způsobená tím, že paprsky na krajích čočky se lámou víc než ty kolem středu, což znamená, že nemají stejné ohnisko, ale jejich ohnisko leží o kousek blíže (Obrázek 3. 5). [10]

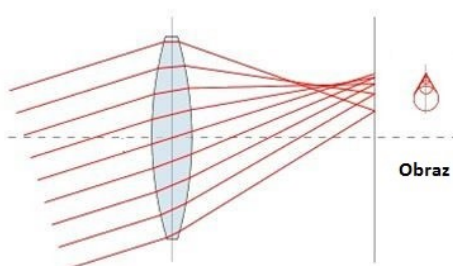




Obrázek 3.5 Kulová vada

### 3.4.3 Koma

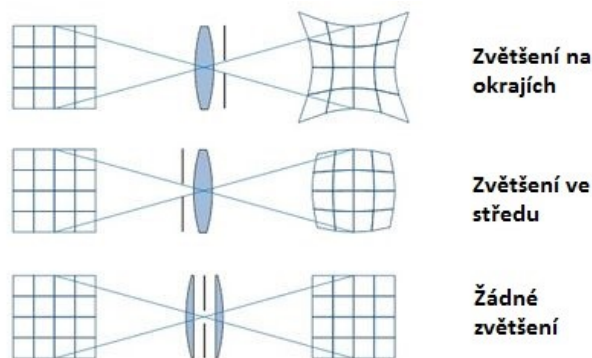
Je tvořena velmi šikmými paprsky procházejícími blízko u okraje čočky, které se lámou velice nepravidelně. Je-li dopadající svazek paprsků dostatečně široký, nezobrazí se bod jako úsečka, ale začne vytvářet obrazce, které připomínají komety (Obrázek 3. 6). [10]



Obrázek 3.6 Koma

### 3.4.4 Zkreslení

Tato vada vzniká odlišným zvětšením bodů různě vzdálených od optické osy. Pokud jsou vnější části obrazu zvětšeny, více než vnitřní je zkreslení poduškovité. V případě většího zvětšení vnitřních částí je pak soudkovité. Soustava bez zkreslení se nazývá ortoskopická (Obrázek 3. 7). [10]

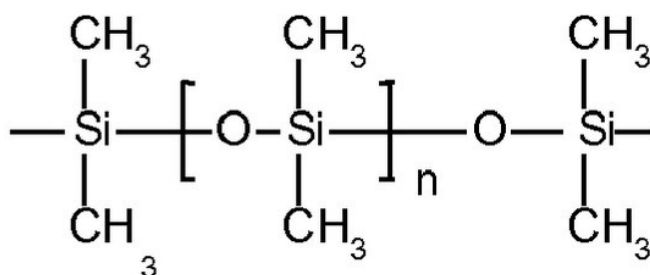


Obrázek 3.7 Možnosti zkreslení

### 3.5 Polydimetylsiloxan

PDMS se řadí mezi polymerní organo-křemičité sloučeniny, obsahující v jedné molekule vazbu Si-O. Bývá označován jako silikonový kaučuk. Pevnost těchto kaučuků je nízká, ale teplota se téměř nemění. Teploty použití se pohybují v od  $-60^{\circ}\text{C}$  až do  $200^{\circ}\text{C}$  a při krátkodobém teplotním namáhání odolávají teplotě až  $350^{\circ}\text{C}$ .

PDMS je čirá kapalina bez zápachu a chuti a téměř se nedá rozpustit ve vodě. PDMS patří mezi opticky čisté materiály, které neobsahují velké množství nečistot, a tudíž nejsou vhodným prostředím pro bakterie. Jeho další vlastnosti jsou: odolný vůči vysokým teplotám, chemikáliím, radiaci a UV záření. Nejčastější použití je např. kosmonautika, lékařství, elektronika, automobilový průmysl a další. Výhoda je výborná teplotní stabilita a nevýhoda, že je nákladný a složitý na výrobu.



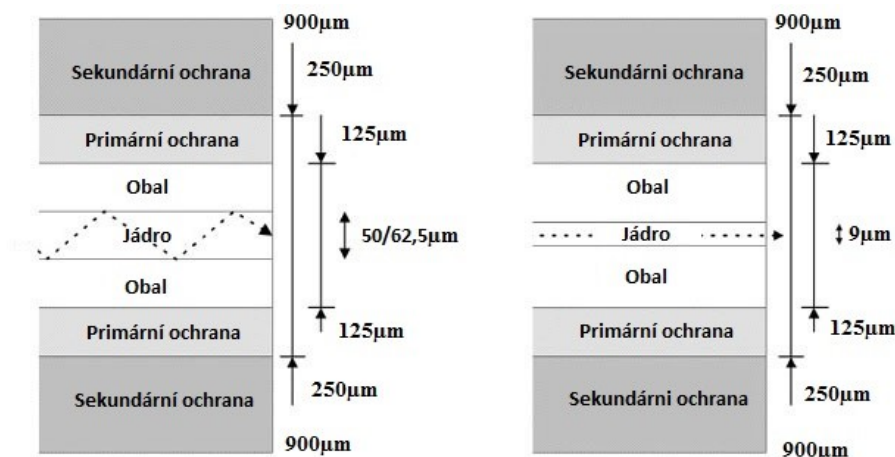
**Obrázek 3.8** Chemický vzorec Polydimetylsiloxanu

Vyrábí se z technického křemíku a kombinací kyseliny chlorovodíkové s metanolem, která vytvoří chlormetan. Výroba se skládá ze čtyř chemických reakcí: syntéza, rektifikace, hydrolýza, polykondenzace. [20]

## 4 Optická vlákna

### 4.1 Popis optických vláken

Optické vlákno je umístěno v primární a sekundární ochraně a skládá se z jádra a pláště. Vyrábí se nejčastěji ze skla, ale v některých případech se používá plast. Plášť je tenká vrstva skla, která obklopuje jádro. Plášť má nižší index lomu a tím zajišťuje vnitřní odraz šířeného světla.



**Obrázek 4.1** Složení mnohovidového (vlevo) a jednovidového (vpravo) vlákna

Vlákno má dva základní parametry, které jsou dané číslem uváděným na popisu kabelu. První číslo je průměr jádra, ve kterém je paprsek přenášen a druhé číslo je průměr obalu, který zajišťuje odraz paprsku a zároveň i určitou část mechanické stability vlákna. Primární ochrana je speciální lak (akrylátový lak), který je nanesen na plášť, chrání vlákno před vlhkostí a zvyšuje celkovou pevnost a lepší manipulaci s vláknem. Tato vrstva má průměr 250  $\mu\text{m}$ . Sekundární ochrana nám zajišťuje ochranu vlákna před mechanickým namáháním a poškozením. Existují dva typy sekundární ochrany:

#### Těsná sekundární ochrana

Tato ochrana se nabaluje přímo na primární ochrannou vrstvu. Její průměr je obvykle 900  $\mu\text{m}$  (suché kabely)

#### Volná sekundární ochrana

Tato ochrana používá ochranný gel nebo volné uložení a v tomto případě je současně několik vláken, pouze s primární ochranou, uloženo do trubičky s ochranným gelem (gelové kabely), (Obrázek 4. 1). [13]

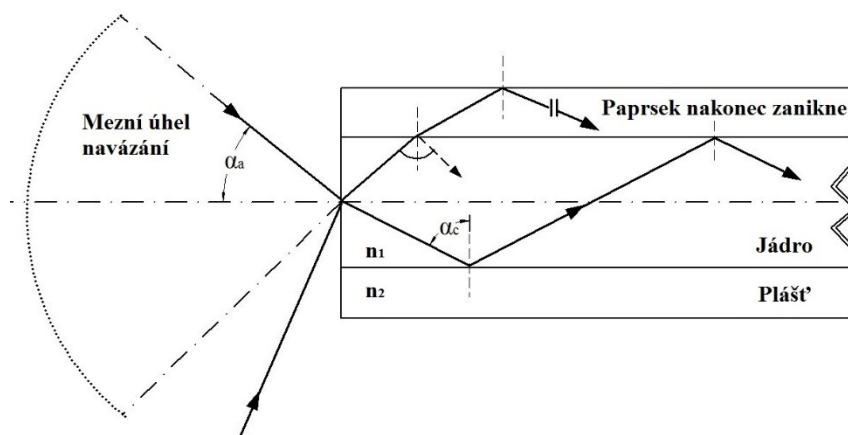
### 4.2 Numerická apertura

Numerická apertura (NA) je bezrozměrný parametr, který nepřímo určuje rozsah vstupního úhlu optického vlákna pro účinnost vazby mezi zdrojem optického záření a optickým vláknem. Velikost numerické apertury má také vliv na šířící se módy optického vlákna, přičemž pod pojmem mód optického vlákna si představíme vlnově ustálenou konfiguraci elektromagnetického pole ve vlákně. Je

zřejmé, že čím je numerická apertura větší, tím lépe je schopno optické vlákno do sebe navázat optické záření ze svého okolí. Základní matematická definice numerické apertury NA má tvar: [16]

$$NA = n_0 \sin(\alpha_a) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (4.1)$$

Čísly je numerická apertura rovna sinusu maximálního úhlu  $\alpha_a$ , pod kterým se vstupující paprsky šíří od začátku vlákna až k jeho konci. Paprsky, které dopadají, pod větším úhlem se ve vláknu šířit nebudou. Pokud je mezní velikost úhlu paprsku vzhledem k ose vlákna překročena, dojde na rozhraní jádra s pláštěm k jeho lomu, paprsek se neodrazí, projde do pláště a je vyvázání ven z vlákna (Obrázek 4. 2). [18]



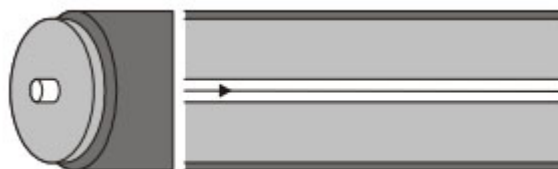
**Obrázek 4.2** Navázání paprsku do optického vlákna

### 4.3 Dělení optických vláken

Základní dělení optických vláken můžeme rozdělit na jednovidová (singlemode) optická vlákna a mnohovidová (multimode) optická vlákna.

#### 4.3.1 Jednovidová optická vlákna

Jednovidová optická vlákna má nejmenší jádro, které umožňuje pouze jeden způsob šíření světla přes jádro. Jednovidová vlákna jsou navržena tak, aby udržovaly prostorovou a spektrální integritu každého optického signálu na delší vzdálenosti, což umožňuje přenášet více informací. I když by se mohlo zdát, že mnohovidová vlákna mají vyšší kapacitu, je to přesně naopak (Obrázek 4. 3).



**Obrázek 4.3** Šíření světla v jednojádrovém vlákně

Mezinárodní standard pro vnější průměr pláště většiny jednojádrových optických vláken je  $125\mu\text{m}$  pro sklo a  $245\mu\text{m}$  pro povrchovou úpravu. Tento standard je důležitý protože zajišťuje kompatibilitu mezi konektory, spojky a nástroji, které se používají v průmyslu. Standartní jednojádrová optická vlákna jsou vyráběny s malou velikostí jádra, přibližně  $8$  až  $10\mu\text{m}$  v průměru. Jednojádrová optická vlákna se většinou používají na delší vzdálenosti a pro aplikace s vyšší šířkou pásma. [16]

#### 4.3.2 Mnohovidová optická vlákna

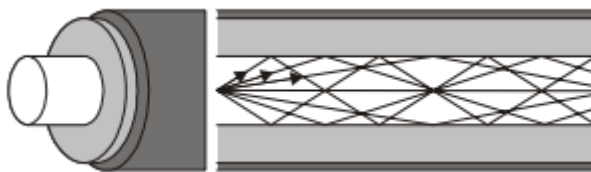
Mnohovidové optická vlákno bylo prvním druhem vlákna, které byly uvedené na trh. Má mnohem větší jádro než jednojádrové optické vlákno, což umožňuje stovky způsobů šíření světla vláknem současně. Kromě toho, větší průměr jádra mnohovidového vlákna usnadňuje použití levnějších optických vysílačů jako například světelných diod (LED). Používá se především v systémech na krátké přenosové vzdálenosti (do  $3\text{ km}$ ), jako je například prostor komunikace privátních datových sítí a paralelních optických aplikací. Z důvodu použití efektivní šířky přenosového pásma se v praxi používají na kratší vzdálenosti. [16]

Mnohovidová optická vlákna mají velké velikosti jádra a velkou numerickou aperturu, což je výhodné pro sběr světla z velkých nebo rozptýlených zdrojů jako jsou LED diody nebo bílé světelné lampy. Také se dobře využívají pro vysoce výkonné aplikace, protože síla je přenášena přes velký průřez ve srovnání s jednojádrovými nebo polarizačními optickými vlákny.

Nedostatkem mnohovidových optických vláken je to, že neudrží vysoce kvalitní prostorové vlastnosti laserů. Místo toho je světlo rozptýluje do mnohovidových režimů uvnitř vlákna. Obvykle jsou tato vlákna vhodná pro infračervené, ultrafialové a viditelné vlnové délky. [17]

#### 4.3.3 Skokový index lomu

U skokového indexu lomu do vlákna vstupují vidy (paprsky) pod mnoha úhly, šíří se totálním odrazem a vytváří mnohovidový způsob šíření signálu. Index lomu pláště s rostoucí vzdáleností od osy vlákna zůstává stejný v celém obalu. Světlo se odráží pod jedním úhlem a používá se na krátké vzdálenosti v průmyslu a automatizaci. Útlum vláken se pohybuje v rozmezí  $5$  až  $10\text{ dB/km}$ . Nevýhodou je vidová disperze (rozdílná doba průchodu světla optickým kabelem), což omezuje šířku přenášeného pásma (Obrázek 4. 4). [16]

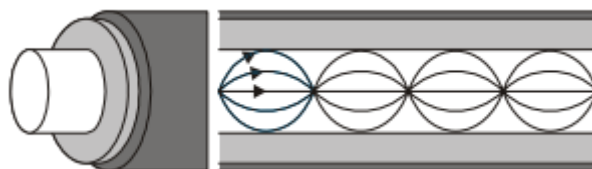


**Obrázek 4.4** Šíření světla v mnohovidovém vlákně se skokovou změnou indexu lomu (MMF SI)

Tyto vlákna mají konstantní index lomu. Typickým materiálem pro použití je tavený oxid křemičitý dopovaný s prvkem jako je germanium. Jádru má velikost od 10  $\mu\text{m}$  do 1500  $\mu\text{m}$ . [17]

#### 4.3.4 Gradientní index lomu (plynulá změna)

U gradientních vláken nedokážeme nalézt rozhraní mezi jádrem a pláštěm, protože jsou jednotlivé skloviny v sobě rozpuštěny. Index lomu se zmenšuje se vzdáleností od středu vlákna, což snižuje vidovou disperzi. Používají se především pro telekomunikační aplikace a přicházejí ve třech standardních velikostech jádro / plášť = 50/125  $\mu\text{m}$ , 62,5/125  $\mu\text{m}$ , 100/140  $\mu\text{m}$  (Obrázek 4. 5). [16]



**Obrázek 4.5** Šíření světla v mnohovidovém vlákně s gradientním průběhem indexu lomu (MMF GI)

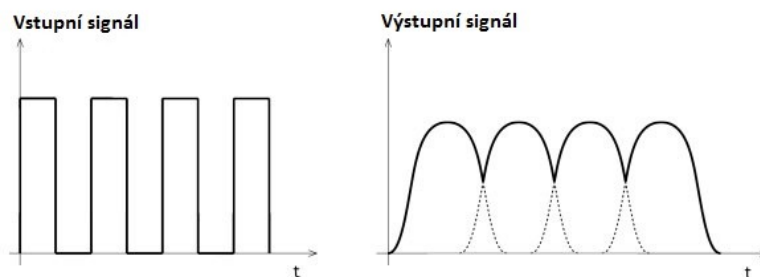
### 4.4 Vlastnosti optických vláken

#### 4.4.1 Disperze

Disperze je důvod, proč je přijímaný signál zkreslený. [18]

#### 4.4.2 Vidová disperze

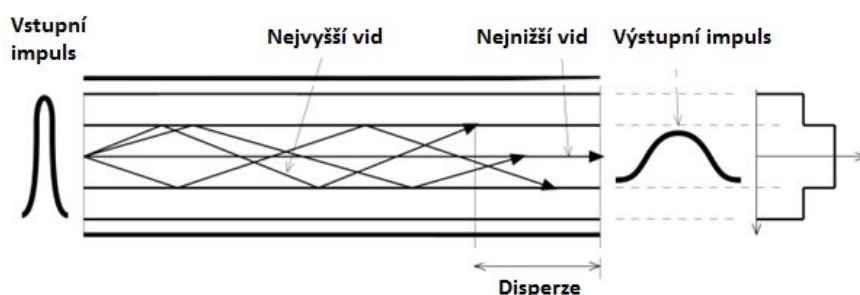
Vidová disperze se prosazuje v mnohovidových vláknech. Každý paprsek dorazí v rozdílných časových okamžicích, kvůli rozdílným délkám drah na konci vlákna. Impulz, který se získává z jednotlivých paprsků je odlišný tvarem a amplitudou od vstupního impulsu (Obrázek 4. 6).



**Obrázek 4.6** Rozšíření výstupních impulsů vlivem disperze

Vidovou disperzi můžeme nalézt u dlouhých vláken, kde jsou data přenášeny na větší vzdálenost, a je omezen počet impulzů, které mohou být vyslány za určitý časový interval. Přenos na velké vzdálenosti (větší než 1 km) má za následek to, že různé paprsky (vidy) nejsou přenášeny za stejnou dobu od začátku až na konec vlákna. Tento typ disperze působí na tvar výstupního impulsu tak, že dojde k jeho zkreslení. Pokud vysíláme do vlákna řadu obdelníkových impulzů, na jeho výstupu bude řada širších výstupních impulzů, které budou mít zmenšenou amplitudu a navzájem se překrývají.

Vidová disperze omezuje mezní šířku pásma, přenosovou rychlost nebo vzdálenost, po které přenášíme data vláknem. Aby mohli mít impulzy na výstupu vlákna vhodný tvar pro jejich detekci, nesmí mít libovolně vysoký kmitočet. Vidová disperze se zmenšuje uspořádáním vlákna, hlavně použitím vláken s gradientní změnou indexem lomu. Vidová disperze se neobjevuje u jednovidových vláken. [18]



Obrázek 4.7 Vznik disperze

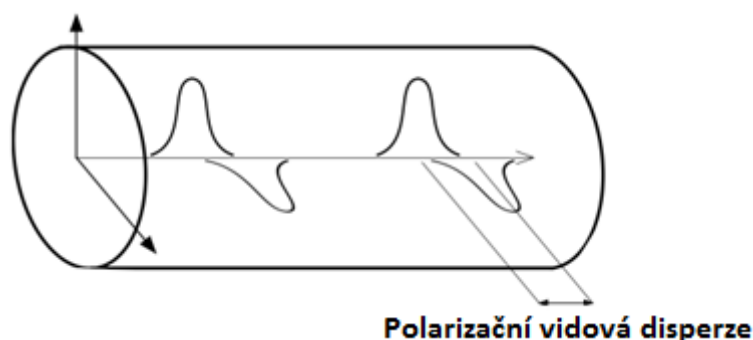
#### 4.4.2.1 Chromatická disperze

Používané zdroje záření nejsou ideálně monochromatické, ale vyzařované optické záření obsahuje určité spektrum vlnových délek. Každá složka tohoto spektra má ve vlákně odlišnou rychlost šíření. S vlnovou délkou se mění index lomu. To způsobí, že na konec vlákna dorazí jednotlivé spektrální složky v jiném časovém okamžiku.

Chromatická disperze omezuje šířku kmitočtového pásma vlákna, zároveň je omezena i vzdálenost, na jakou můžeme přenášet. U standardních jednovidových optických vláken je v oblasti 1310 nm nulová a na 1550 nm omezuje jejich použití, to znamená přenosovou rychlost nebo vzdálenost. [18]

#### 4.4.2.2 Polarizační vidová disperze

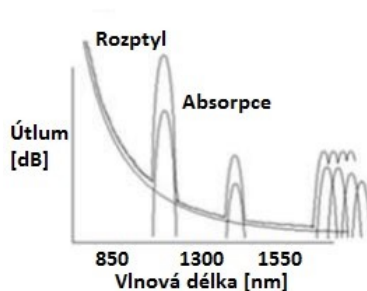
Tato disperze se projevuje u jednovidových optických vláken. Jediný vid se šíří ve dvou vzájemně kolmých polarizačních rovinách jednovidovým vláknem. Kruhové nesymetrie vlákna (z výroby; mikroohyby) způsobují šíření obou polarizací, kdy každá má jinou rychlost, tedy rozšíření impulsu nebo zkreslení analogového signálu. Může mít vliv na širokopásmové analogové přenosy (signály kabelové televize), pokud přenosové rychlosti vzrostou nad 2,5 Gb/s. Polarizační disperze je oproti jiným druhům disperzí mnohem menší (Obrázek 4. 8). [18]



Obrázek 4.8 Polarizační vidová disperze

#### 4.4.3 Útlum

Útlum nám říká, jaký podíl navázaného světla na dané vlnové délce projde na druhý konec vlákna. Je závislý na vlnové délce a je to proto, že absorpce i rozptyl, které jsou jeho příčinou, jsou spektrálně závislé. V souvislosti s optickým útlumem křemenných optických vláken hovoříme obvykle o třech tzv. oknech propustnosti okolo 850, 1300 a 1550 nm, ve kterých jsou primárně provozovány optické komunikace (Obrázek 4. 9). [18]



Obrázek 4.9 Útlum optického vlákna

#### 4.4.4 Materiálová absorpce

Ztráty v materiálu jádra se projevují ve vlastní a nevlastní absorpci a rozptylem v materiálu jádra. Všechny ztráty jsou závislé na vlnové délce optického záření.

Vlastní absorpce spočívá v tom, že pohltí částí optického záření svými vlastními molekulami materiálu optického vlákna (například oxid křemičitý). Křemenný materiál vykazuje absorpční maxima v infračervené i ultrafialové oblasti.

Nevlastní absorpce je zapříčiněná pohlcením částí optického záření molekulami nečistot, které do vlákna navázaly při jeho výrobě. Nevlastní absorpce jsou příčinou přítomností Fe, Cu, Cr a vody ve skle optického vlákna, které mohou vnikat do materiálu vlákna při výrobě a také v důsledku špatné vnější ochrany. U kvalitních skel musí být iontová koncentrace nižší než  $10^{-9}$  pro ionty kovů a než  $10^{-7}$  pro ionty vody. [18]

#### 4.4.5 Rozptyl

##### 4.4.5.1 Ztráty ohybem

Ohýbáním optického vlákna se mění úhly dopadu a odrazu přenášených paprsků. Následkem může být, že některý paprsek překročí mezní hodnotu úhlu odrazu a pronikne do pláště a už se nevrátí se do jádra vlákna. Na výstupu vlákna potom dostaneme menší počet paprsků, než při jeho vstupu.

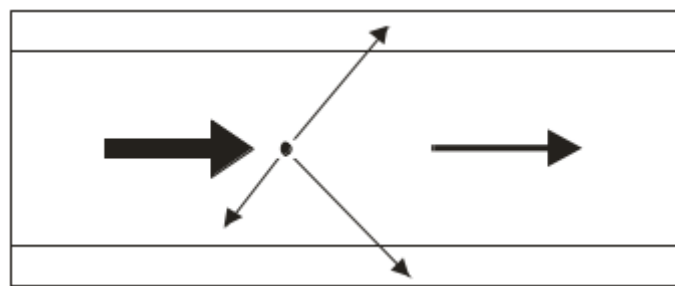


Tento jev je pro přenosové aplikace optických vláken velice nežádoucí. Je možné, ale tento jev využít při výrobě optických senzorů, které jsou založené na zakřivení optického vlákna. Je potřeba dodržovat pokyny výrobce a vlákno ohýbat s co největším poloměrem, aby nedošlo ke ztrátám při ohybu. Minimální poloměr ohybu vlákna je nejmenší ohyb, který můžeme použít při instalaci vlákna. Závisí na průměru optického vlákna, popřípadě kabelu a na materiálu, ze kterého se vlákno vyrábí. Čím větší je průměr vlákna, tím větší bude i minimální poloměr ohybu. Vlákná, která se vyrábí z plastu, mají stejný průměr jako vlákna skleněná ale jejich minimální poloměr je menší. [18]

#### 4.4.5.2 Rayleighův rozptyl

Vzniká důsledkem elastických kolizí mezi procházejícím optickým zářením a molekulami hmoty jádra optického vlákna. Vzniknou lomy a odrazy částí paprsků, které se následkem toho tříští do všech směrů. Rozptýlené optické záření, které změnilo směr šíření se odkloní a proniká do pláště, kde se ztratí.

Ztráty rozptylem vznikají tak, že molekuly v amorfním (amorfní látka bez krystalické mřížky s pravidelnými uspořádanými částicemi - sklo, plyny, a další) materiálu, které jsou, náhodně rozložené tvoří mikro-nehomogenity indexu lomu materiálu. Je-li vlnová délka rozměrově větší než nehomogenity a nečistoty, potom ztráty, které vznikají, se nazývají Rayleighovy. Mají všesměrový rozptyl a jsou přítomné vždy (po dopadu se tříští na nehomogenitu do všech stran a to má za následek ztrátu části výkonu), (Obrázek 4. 10). [18]



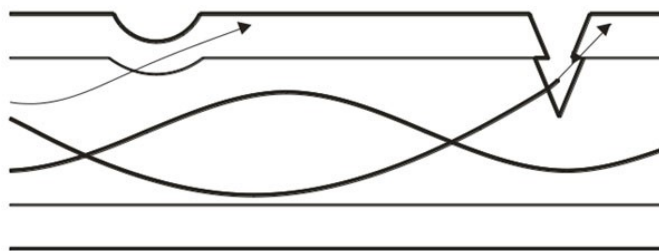
Obrázek 4.10 Rayleighův rozptyl

#### 4.4.6 Ohybové ztráty

Důležitá vlastnost optických vláken je citlivost na ohyby. Tato vlastnost se projeví navýšením útlumu vlákna. V místě, kde se nachází ohyb je optické vlákno, více náchylné na poškození.

##### 4.4.6.1 Mikroohyby

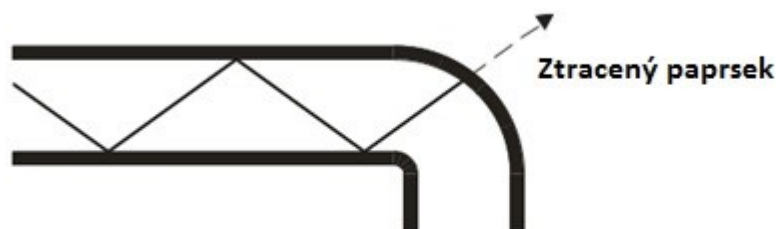
Mikroohyby jsou chyby přímocárnosti osy vlákna a malé chyby v geometrii vlákna. Vznikají při výrobě a také působením okolních prvků, které mají za následek deformaci pláště kabelu, ale způsobují pouze malý ohyb vlákna. Pokud se mikroohyby vyskytují po celé délce optického vlákna, mohou mít výrazný vliv na jeho útlum (Obrázek 4. 11). [14]



**Obrázek 4.11** Mikroohybové ztráty

#### 4.4.6.2 Makroohyby

Makroohyby, které mívají větší průměr ohybu (mm,cm) jsou časté a vznikají při práci s optickými vlákny. Vláknem optické trasy bychom neměli vystavovat ohybu o průměru menším než 6cm. Jak velký bude útlum optického vlákna, způsobeného ohybem závisí hlavně na velikost průměru ohybu, jakému bylo vlákno vystaveno. [14]



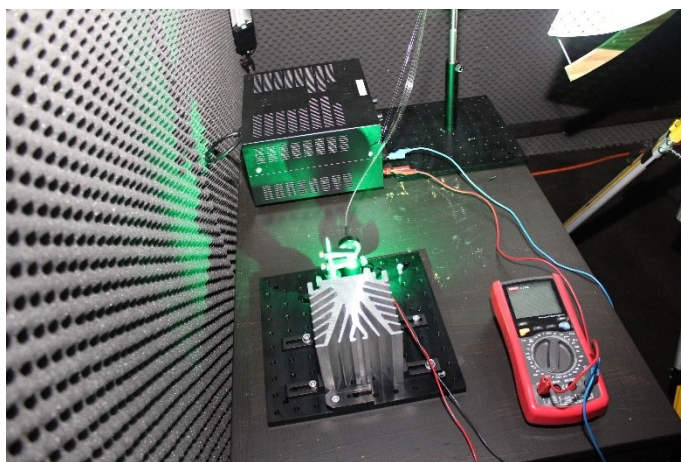
**Obrázek 4.12** Makroohybové ztráty

## 5 Praktická část

### 5.1 Úvod do měření optických vysílačů

Pro měření byly použity následující přístroje (obrázek 5. 1): zdroj napětí (nastaveno napětí 4,2V a proud 1,42A), výkonovou diodu s pasivním chladičem z důvodu teplotní ochrany, měřič napětí a proudu, svazek optických vláken (7 a 19 vláken), polystyrenový přípravek pro uchycení optických vláken, speciální Thorlabs držák pro uchycení polystyrenového přípravku, měřič optického výkonu Thorlabs PM 100D s fotodetektorem, stabila držák pro uchycení 1/8 koule, 1/8 koule, multividová vlákna s parametry 50/125 $\mu\text{m}$ , 62,5/125 $\mu\text{m}$  a 105/125 $\mu\text{m}$ .

Při zapnutí zdroje se rozsvítí výkonová dioda, jejíž světlo je vyzařováno přes čočku do svazku optických vláken a následně na plochu 1/8 koule.



Obrázek 5.1 Použité přístroje

### 5.2 Měření optických vysílačů na ploše

Tato práce se zabývá měřením intenzity světla na ploše 1/8 koule za pomoci mnohovydových vláken. Měření na této ploše se provádí tak, že se přiloží fotodetektor na jednotlivé díry a změří se optický výkon.



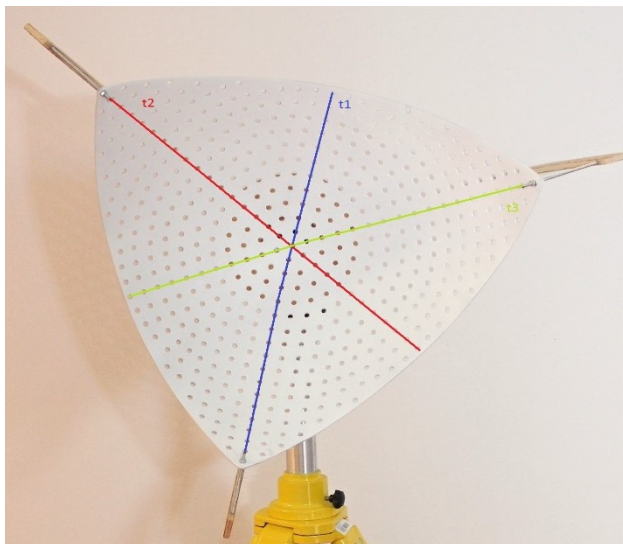
**Obrázek 5.2** *Plocha 1/8 koule*

Tato 1/8 koule se skládá celkem z 16 kruhů. Každý kruh obsahuje několik děr, které jsou od sebe vzdáleny v průměru 2cm. Což znamená, že čím víc se vzdálíme od středu, tím více děr přibude. Od 10 kruhu tu vzniká nesymetrie způsobená nedodržením tvaru kulové plochy (Obrázek 5. 2).



**Obrázek 5.3** *Souřadnicový systém*

Celkem 1/8 koule obsahuje střed, 1 kruh se skládá z 6 děr, 2 kruh ze 12 děr, 3 kruh z 18 děr, 4 kruh z 24 děr, 5 kruh z 30 děr, 6 kruh z 36 děr, 7 kruh ze 42 děr, 8 kruh ze 48 děr, 9 kruh z 54 děr, 10 kruh z 60 děr. U 11 kruhu už můžeme vidět nesymetrii v podobě 63 děr, měl by ovšem obsahovat 66 děr. Od 12 kruhu už nejsou kompletní kruhy, ale už se měří jen díry na okrajích 1/8 koule. Celá 1/8 koule obsahuje celkem 507 děr (obrázek 5. 2).



**Obrázek 5.4** Vyznačení těžnic na 1/8 koule

Při vypracování v podobě grafů, jsme pracovali pouze z hodnotami, které byly obsažené na těžnicích t1, t2 a t3 (obrázek 5. 3). Je to z důvodu, abychom mohli zhodnotit, jak se rozloží světlo na ploše pod -3dB hranicí. -3dB hranice je polovina naměřené intenzity (50%).

## 5.3 Konstrukce optických vysílačů

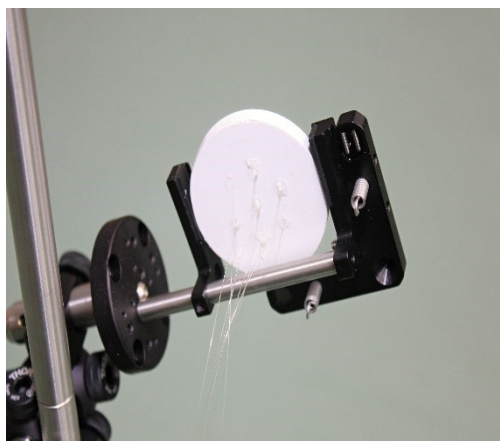
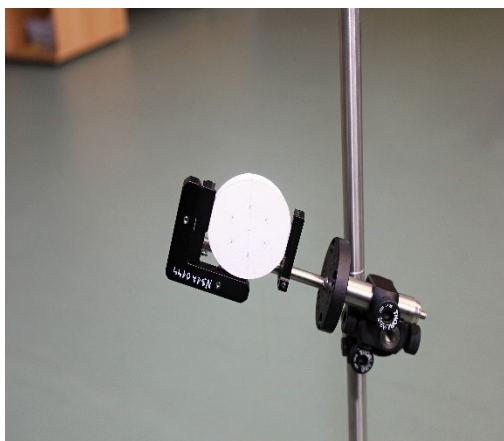
### 5.3.1 Úvod do konstrukce optických vláken

Abychom mohli vyzařovat světlo na plochu, museli jsme si vyrobit polystyrenový přípravek pro optická vlákna. Nejdříve se vzal kus polystyrenu a pomoci vrtáku se vyrobily kolečka. Na tyto kolečka se následně nakreslily kružnice a vyznačili body pro vyvrtání děr (Obrázek 5. 5, Obrázek 5. 6).

### 5.3.2 Konstrukce optických vysílačů pro 7 vláken

Vytvořili jsme si 2 typy těchto přípravků. První, pro uchycení 7 vláken, který obsahuje středový bod a kružnici se 6 body v poloměru 1 cm od středu. Tyto body jsou vrtány pod úhlem 13 stupňů (Obrázek 5. 5).

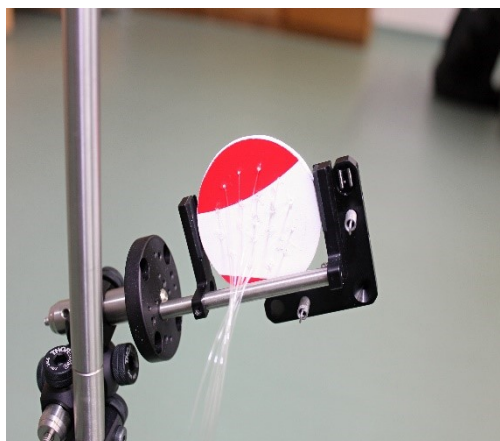
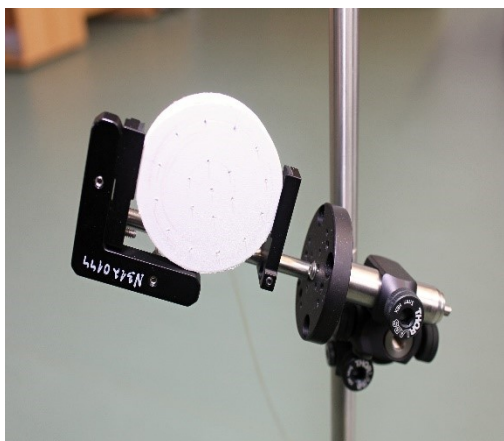




**Obrázek 5.5** Optický vysílač vytvořený ze 7 optických vláken

### 5.3.3 Konstrukce optických vysílačů pro 19 vláken

Druhý přípravek byl vytvořený pro uchycení 19 vláken (Obrázek 5.6). Obsahuje středový bod, vnější kružnici o poloměru 2 cm, který obsahuje 12 bodů a vnitřní kruh o poloměru 0,85 cm, který obsahuje 6 bodů. Body ve vnější kružnici jsou vrtány pod úhlem 34 stupňů. Body ve vnitřním kruhu jsou vrtány pod úhlem 16 stupňů (Obrázek 5.6).



**Obrázek 5.6** Optický vysílač vytvořený ze 19 optických vláken

Přípravky se umísťovaly do speciálního držku Thorlabs z důvodu jednoduché manipulace při měření (Obrázek 5. 5, Obrázek 5.6).

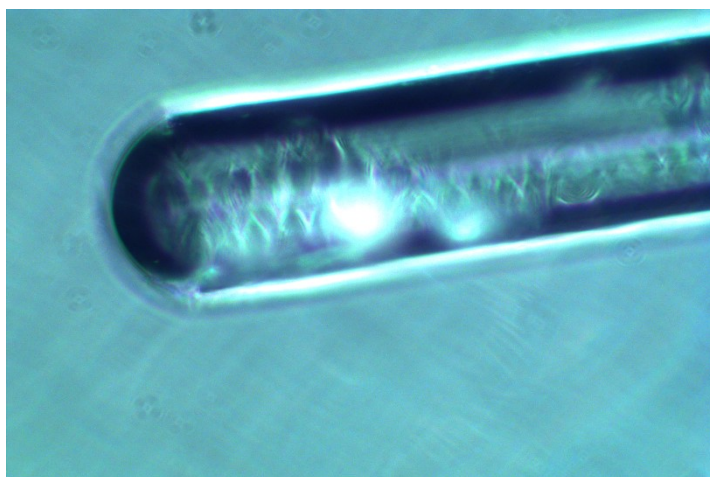
## 5.4 Výroba čoček

Čočky se optickým vláknem vytvoří tak, že se nejprve vytvoří polydimetylsiloxan (kapitola 3.5). Vezme se optické vlákno, u kterého se odstraní plášť, vlákno se zalomí a očistí. Následně se vloží na speciálně upravený držák a zatíží magnety. Naproti optickému vláknu se vloží špejle (nějaký druh tyčinky), na kterou se nanese vrstva polydimetylsiloxanu. Zapne se mikroskop a pomalu se přibližuje optické vlákno ke špejli, dokud se nespojí a polydimetylsiloxan se nepřelil na optické vlákno.



**Obrázek 5.7** Laboratorní vybavení pro výrobu čoček

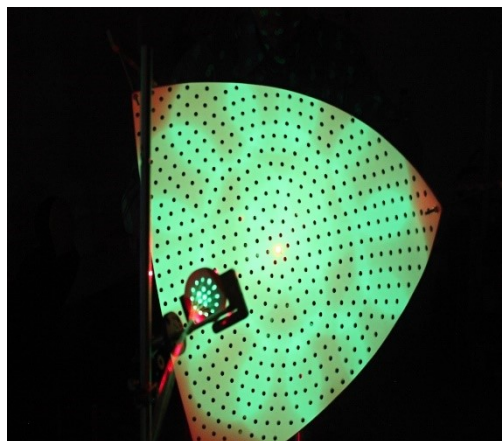
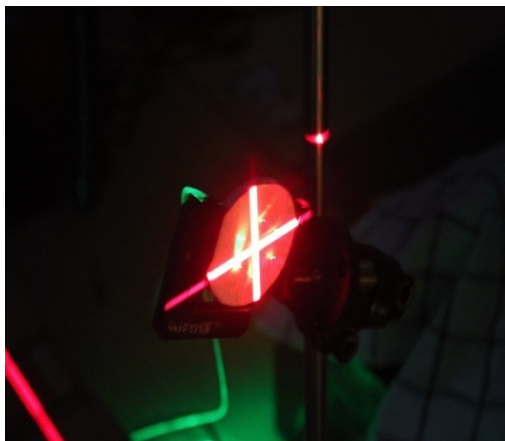
Optické vlákno se znovu oddálí. Vezme se pájka, která se drží těsně pod optickým vláknem s naneseným polydimetylsiloxanem. Poté se počká asi minutu, dokud polydimetylsiloxan na optickém vlákně neztuhne. V žádném případě se nesmí pájka dotknout optického vlákna, aby se nepoškodilo optické vlákno a polydimetylsiloxan neroztavil. Tento postup se opakuje pro všechna vlákna. Nakonec se optická vlákna zalepí a nechají zaschnout.



**Obrázek 5.8** Nanášení čočky (polydimetylsiloxanu) pod mikroskopem

## 5.5 Středování optických vysílačů

Zarovnání optických vláken na střed, se provádělo tak, že se vzala laserová dioda, která se vložila ke středovému bodu na 1/8 koule. Následně se objevil laserový kříž, který se upravil tak, aby byl přímo zaměřený na optické vlákno ve středu polystyrenového přípravku (Obrázek 5. 9).



**Obrázek 5.9** Ukázka středování optických vláken pomocí laserové diody

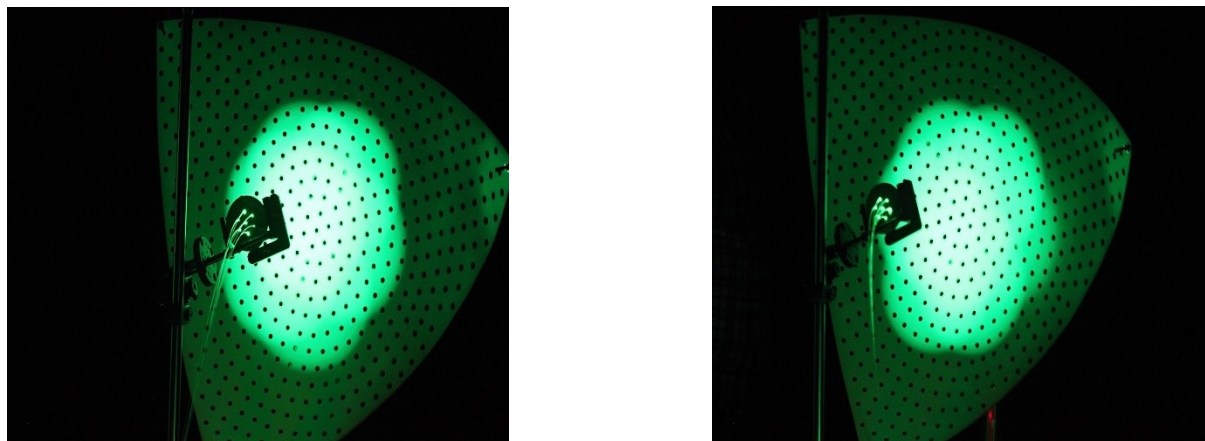


## 6 Experimentální měření

Při měření se pracuje se třemi různými druhy optických vláken. Jedná se o mnohovidová vlákna typu 50/125 $\mu\text{m}$ , 62,5/125 $\mu\text{m}$  a 105/125 $\mu\text{m}$  (jádro/plášť). U každého optického vlákna se provádělo několik měření. První měření bylo pro 7 vláken, které se provádělo ve vzdálenosti 30 a 34 cm. Druhé měření bylo pro 19 vláken, které se provádělo ve vzdálenosti 30 a 34cm. Nakonec se všechny měření opakovaly i pro optická vlákna s čočkami (nanesený polydimetylsiloxan). Celkem proběhlo 24 měření. V této práci se zabýváme měřením ze vzdálenosti 30cm.

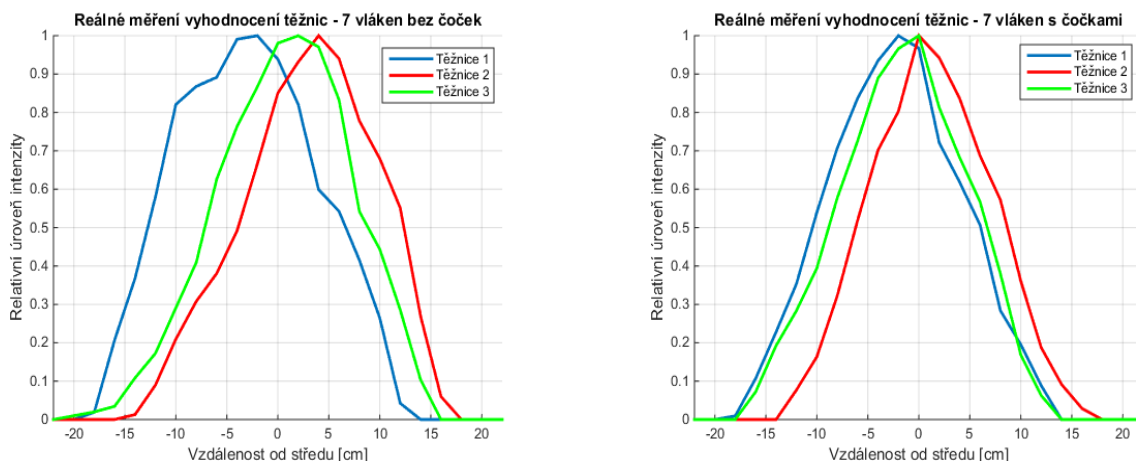
### 6.1 Měření optického vysílače pro mnohovidové vlákno s parametry 50/125 $\mu\text{m}$

#### 6.1.1 Měření optického vysílače pro 7 vláken



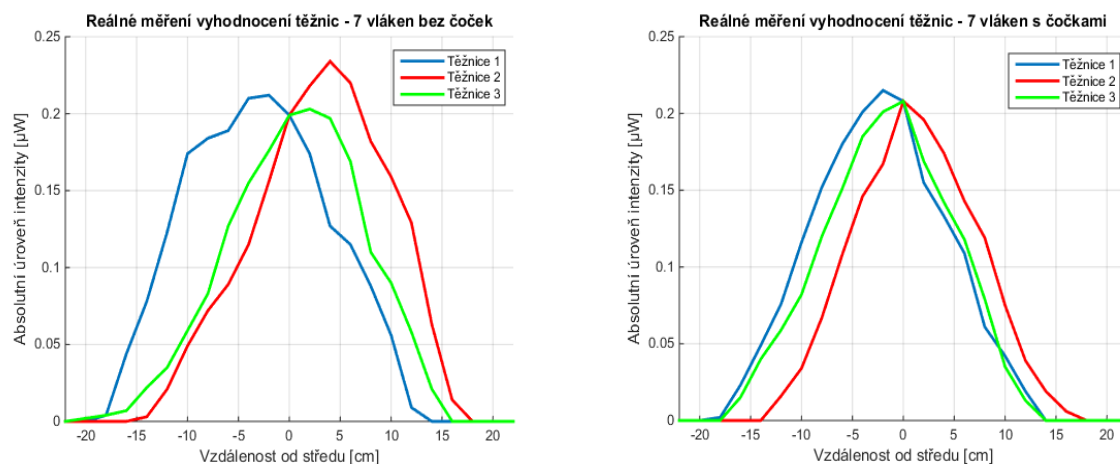
**Obrázek 6.1** Měření 7 vláken bez čoček (vlevo) a 7 vláken s čočkami (vpravo) pro 50/125 $\mu\text{m}$

Při měření optického vlákna 50/125 $\mu\text{m}$  pro 7 vláken jsme naměřili nejmenší výkon ze všech 3 testovaných optických vláken. Naměřený výkon se pohyboval do 0,25 $\mu\text{W}$ . Při měření s čočkami jsme nepozorovali žádnou změnu. Výkon se změnil jen zanedbatelně, což mohlo být způsobeno například nečistotou na konektoru nebo chybou při výrobě čoček (Obrázek 6. 1).



**Obrázek 6.2** Relativní vyhodnocení naměřených hodnot pro 7 vláken s čočkami a bez čoček pro 50/125 $\mu$ m

Na grafickém vyhodnocení bez čoček můžeme vidět, že nám relativní úroveň intenzity klesá se vzdáleností od středu. Můžeme také vidět, že se nám úroveň intenzity pod hranicí -3dB (50% = 0,5) rovnoměrně rozkládá po ploše. To stejné platí i pro vyhodnocení s čočkami (Obrázek 6. 2).



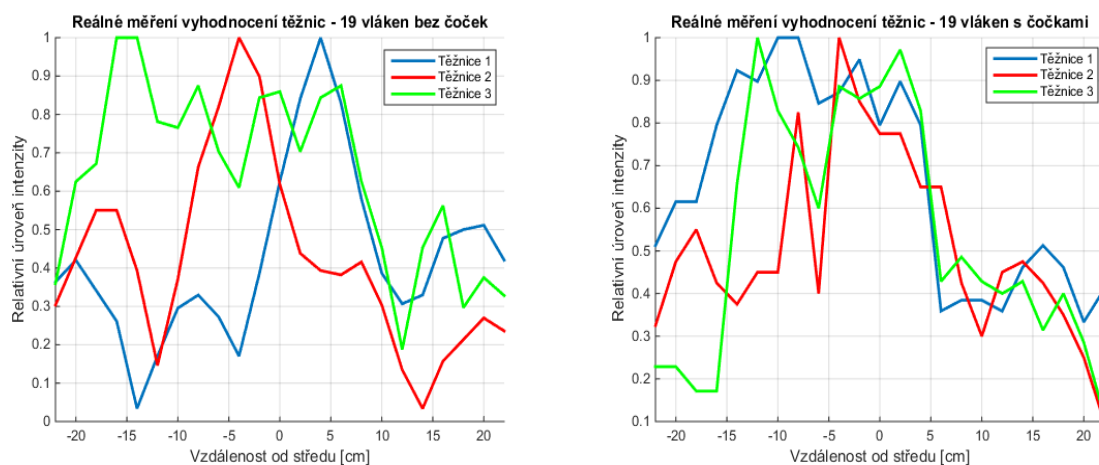
**Obrázek 6.3** Absolutní vyhodnocení naměřených hodnot pro 7 vláken s čočkami a bez čoček pro 50/125 $\mu$ m

## 6.1.2 Měření optického vysílače pro 19 vláken



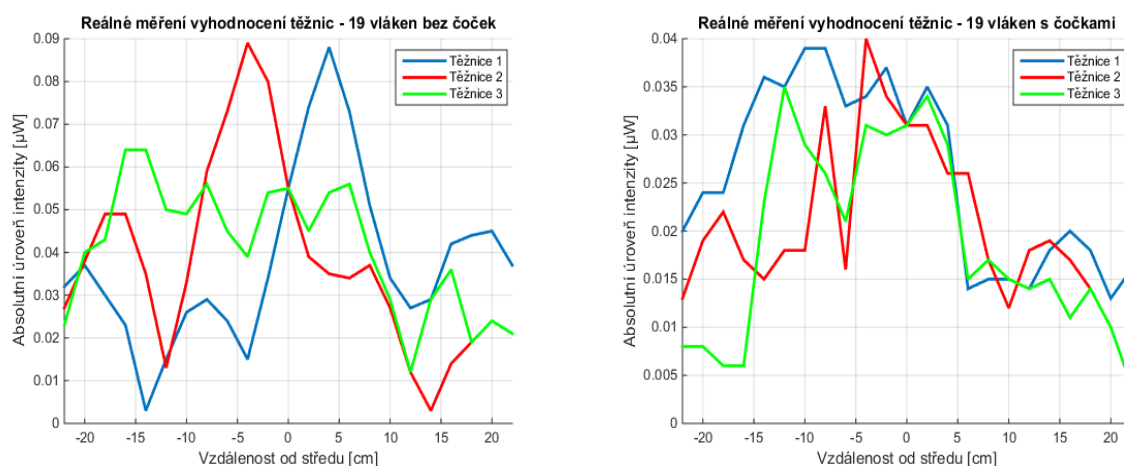
**Obrázek 6.4** Měření 19 vláken bez čoček (vlevo) a 19 vláken s čočkami (vpravo) pro 50/125 $\mu$ m

Při měření optického vlákna 50/125 $\mu$ m pro 19 vláken se stejně jako u 7 vláken naměřili nejmenší výkon ze všech 3 typů optických vláken. Při měření s čočkami se ozařovaná plocha rozšířila a výkon se opět snížil. Na krajích 1/8 koule byly měřeny jen minimální hodnoty jak s čočkami, tak i bez čoček (Obrázek 6. 4).



**Obrázek 6.5** Relativní vyhodnocení naměřených hodnot pro 19 vláken s čočkami a bez čoček pro 50/125 $\mu$ m

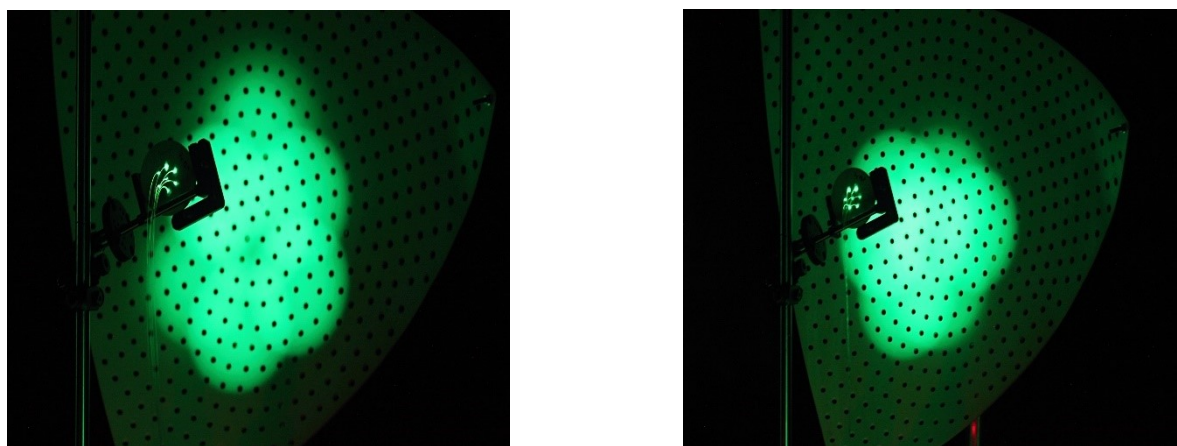
Z vyhodnocení lze zpozorovat, že nastala chyba s jedním optickým vláknem, které mělo za následek, kousek neozařené plochy, což se odráží tak, že úroveň intenzity se rovnoměrně nerozkládá. Po vyhodnocení s čočkami se plocha, kterou vyzařují optická vlákna, rozšířila, stále ovšem stále pozorujeme místa nepokrytá světlem. (Obrázek 6. 5).



**Obrázek 6.6** Absolutní vyhodnocení naměřených hodnot pro 19 vláken s čočkami a bez čoček pro 50/125μm

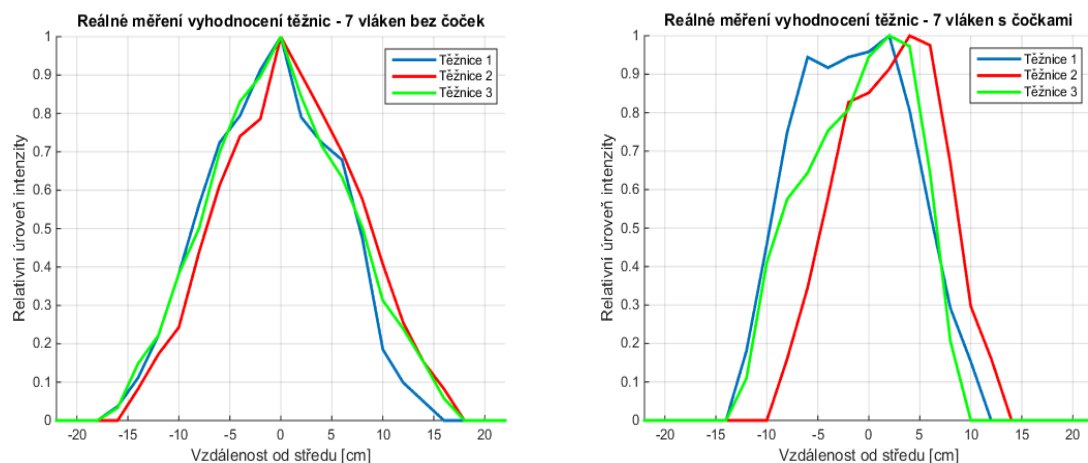
## 6.2 Měření optického vysílače pro mnohovydové vlákno s parametry 62,5/125 μm

### 6.2.1 Měření optického vysílače pro 7 vláken



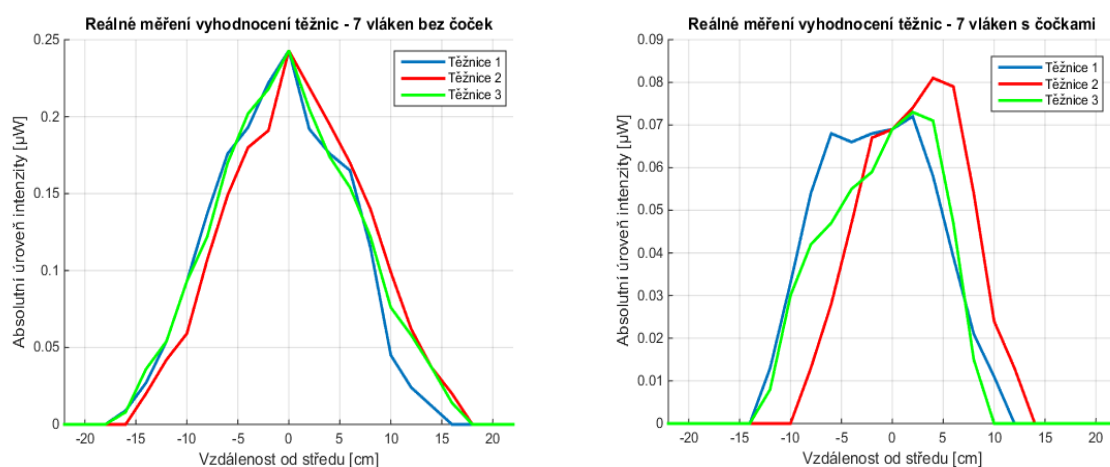
**Obrázek 6.7** Měření 7 vláken bez čoček (vlevo) a 7 vláken s čočkami (vpravo) pro 62,5/125μm

Při měření optického vlákna 62,5/125μm pro 7 vláken s čočkami se zmenšila ozařovaná plocha a zároveň klesl výkon o více než 50% (Obrázek 6.7).



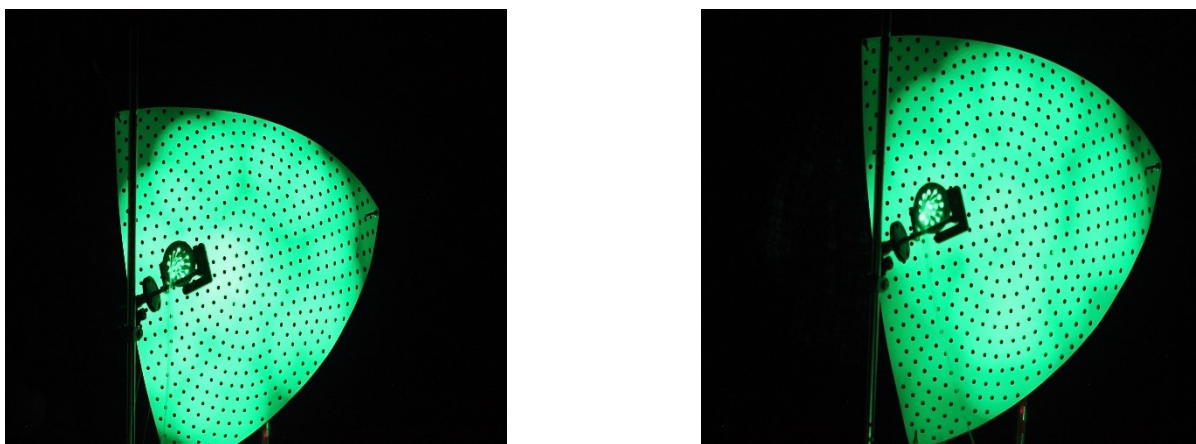
**Obrázek 6.8** Relativní vyhodnocení naměřených hodnot pro 7 vláken s čočkami a bez čoček pro 62,5/125 $\mu$ m

Na grafickém vyhodnocení bez čoček vidíme, že úroveň intenzity klesá se vzdáleností od středu. Dále lze vidět, že úroveň intenzity pod -3dB hranicí se rovnoměrně rozkládá po ploše. U vyhodnocení s čočkami se úroveň intenzity, také rovnoměrně rozkládá po ploše, která se po použití čoček trochu zmenšila.(Obrázek 6. 8).



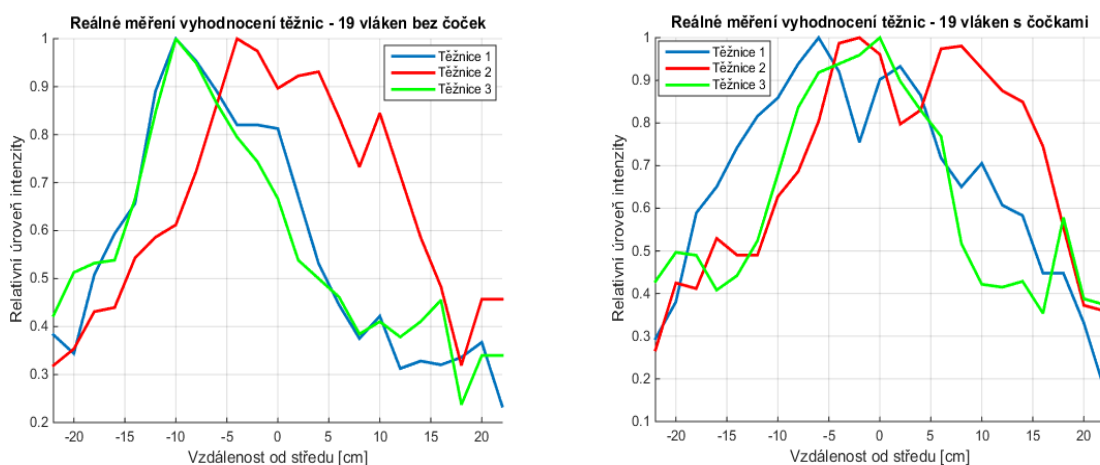
**Obrázek 6.9** Absolutní vyhodnocení naměřených hodnot pro 7 vláken s čočkami a bez čoček pro 62,5/125 $\mu$ m

### 6.2.2 Měření optického vysílače pro 19 vláken



**Obrázek 6.10** Měření 19 vláken bez čoček (vlevo) a 19 vláken s čočkami (vpravo) pro 62,5/125 $\mu$ m

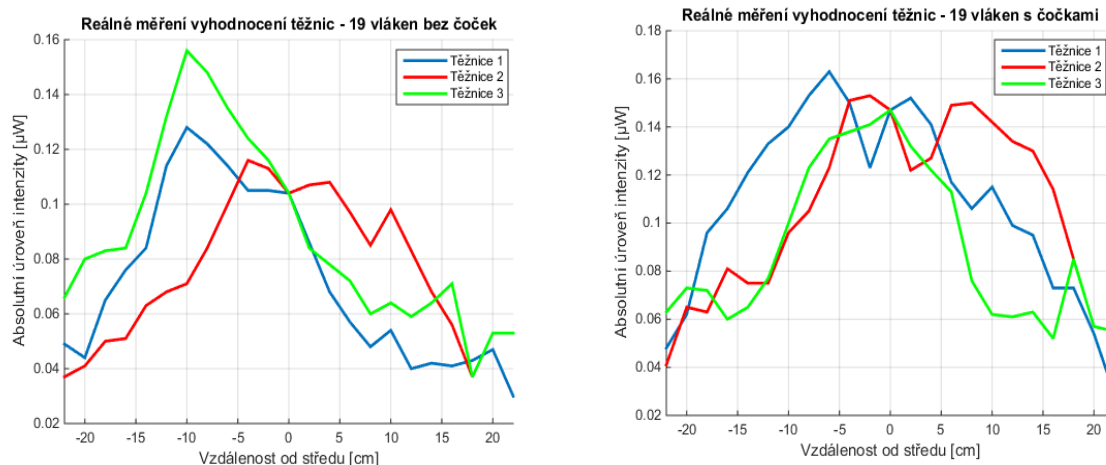
Při měření optického vlákna s průměrem 62,5/125  $\mu$ m pro 7 vláken se po použití čoček, plocha, kterou osvětlují, jednotlivá optická vlákna zvýšila. Výkon se mírně zvýšil, což mohlo například způsobit očištění konektoru (Obrázek 6.10).



**Obrázek 6.11** Relativní vyhodnocení naměřených hodnot pro 19 vláken s čočkami a bez čoček pro 62,5/125 $\mu$ m

Na grafickém vyhodnocení bez čoček lze pozorovat, že se úroveň intenzity nerovnoměrně rozkládá po ploše. S čočkami se úroveň intenzity světla rovnoměrněji rozšířila po ploše. (Obrázek 6.11).

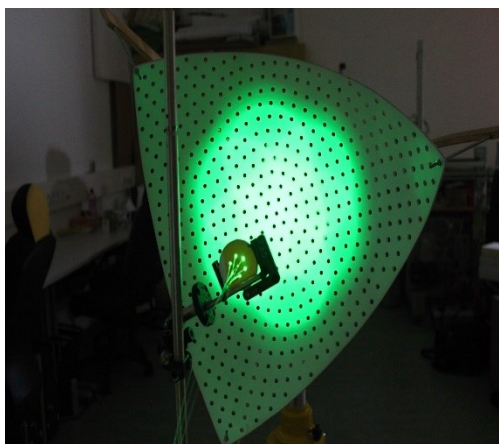




**Obrázek 6.12** Absolutní vyhodnocení naměřených hodnot pro 19 vláken s čočkami a bez čoček pro 62,5/125μm

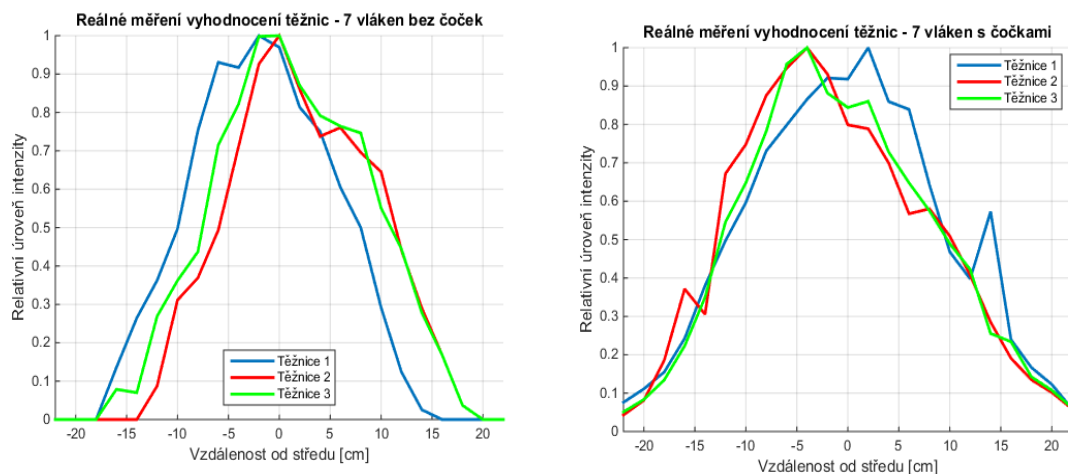
### 6.3 Měření optického vysílače pro mnohovydové vlákno s parametry 105/125 μm

#### 6.3.1 Měření optického vysílače pro 7 vláken



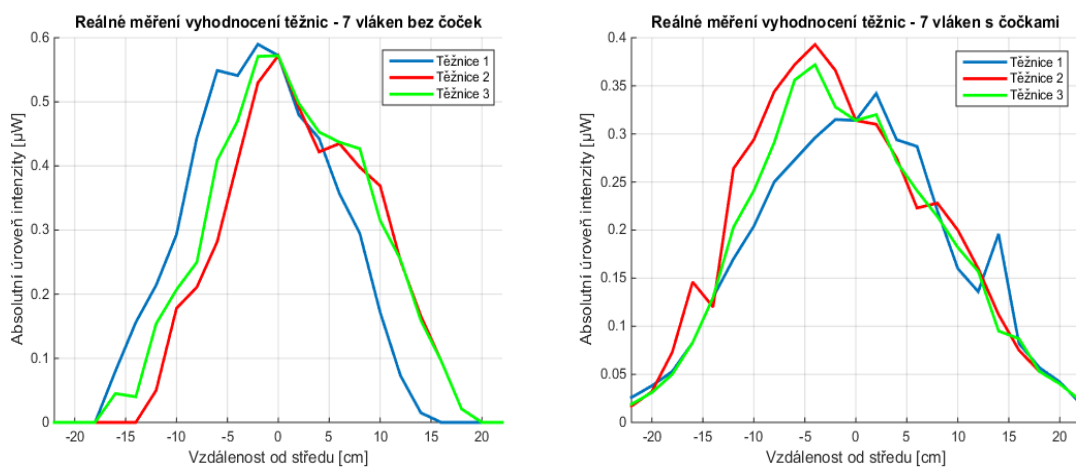
**Obrázek 6.13** Měření 7 vláken bez čoček pro 105/125μm

Při měření optického vlákna 105/125 μm se dosáhlo nejvyšších výkonových hodnot, které jsme pro 7 vláken naměřili u všech typů vlákna. Při měření s čočkami se výkon snížil zhruba o polovinu výkonu a ozařovaná plocha se rozšířila (Obrázek 6.13).



**Obrázek 6.14** Relativní vyhodnocení naměřených hodnot pro 7 vláken s čočkami a bez čoček pro 105/125 $\mu$ m

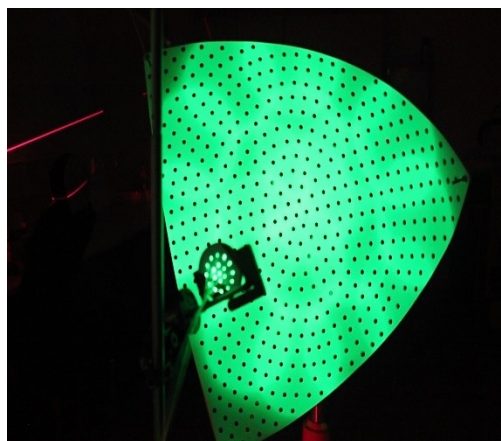
Na grafickém vyhodnocení bez čoček lze pozorovat, že nám úroveň intenzity, klesá se vzdáleností od středu. Dále můžeme vidět, že úroveň intenzity se rovnoměrně rozkládá po ploše. S čočkami se úroveň intenzity, také (až na drobné výchyly) rovnoměrně rozkládá po ploše (Obrázek 6. 14).



**Obrázek 6.15** Absolutní vyhodnocení naměřených hodnot pro 7 vláken s čočkami a bez čoček pro 105/125 $\mu$ m

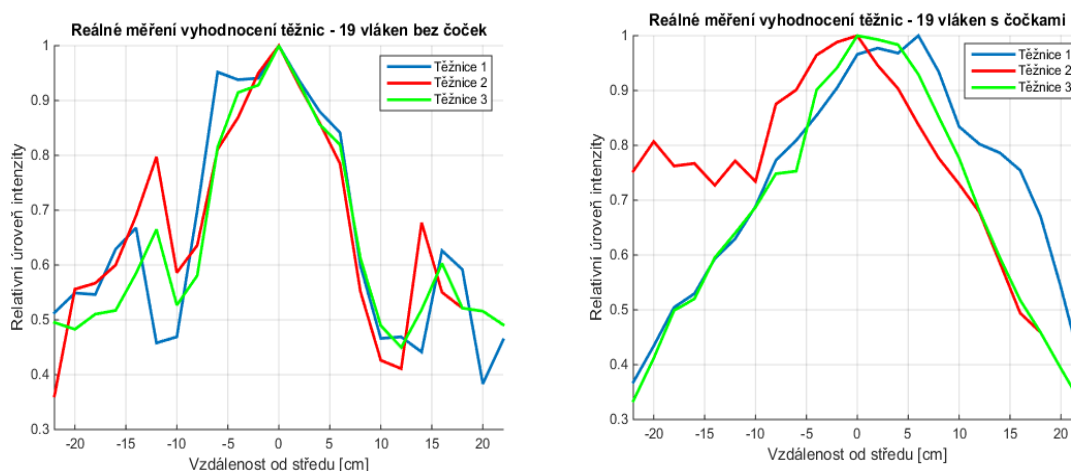


### 6.3.2 Měření optického vysílače pro 19 vláken



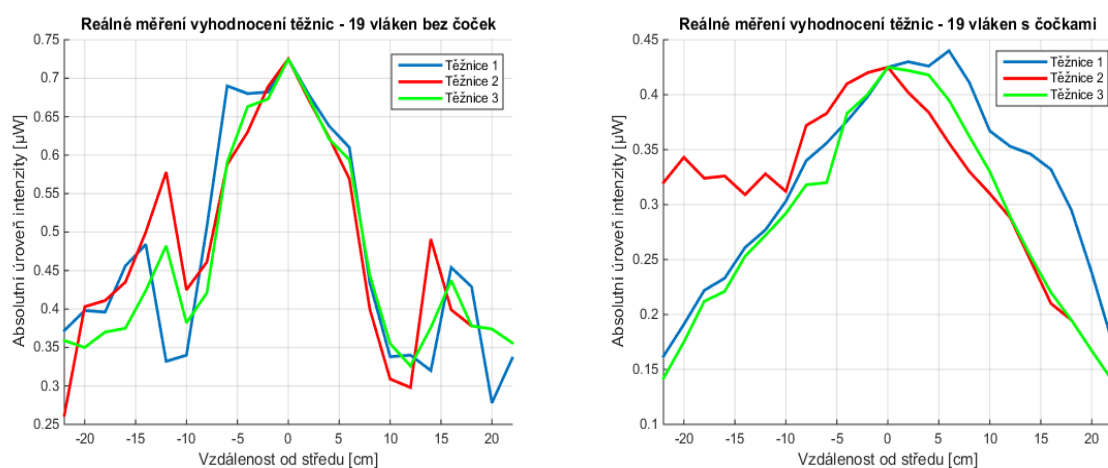
**Obrázek 6.16** Měření 19 vláken bez čoček pro 105/125 $\mu$ m

Při měření optického vlákna 105/125 $\mu$ m pro 19 vláken se osvětlila celá plocha 1/8 koule a naměřil se největší výkon ze všech typů optických vláken. Při měření s čočkami výkon klesl zhruba o polovinu výkonu a ozařovaná plocha se rozšířila (Obrázek 6.16).



**Obrázek 6.17** Relativní vyhodnocení naměřených hodnot pro 19 vláken s čočkami a bez čoček pro 105/125 $\mu$ m

Na grafickém vyhodnocení bez čoček lze pozorovat, že se úroveň intenzity nerovnoměrně rozkládá po ploše. Také můžeme vidět, že se nám výkon držel kolem -3dB hranice. S čočkami se úroveň intenzity rozšířila a rovnoměrněji rozdělila po ploše. U měření s čočkami se objevila chyba u těžnice 2, která může být způsobená bublinkami při vytváření polydimetylsiloxanu. (Obrázek 6. 17).



**Obrázek 6.18** Absolutní vyhodnocení naměřených hodnot pro 19 vláken s čočkami a bez čoček pro 105/125 $\mu\text{m}$

## Závěr

Při měření 3 různých typů optických vláken bylo zjištěno, že každé vlákno má jiné specifické výkonové vlastnosti. Měření numerické apertury ukázalo, že u všech 3 typů optických vláken, by se při měření s čočkami měla rozšířit ozařovaná plocha, což se projevilo hlavně u optického vlákna 105/125 $\mu$ m. U optického vlákna 50/125 $\mu$ m pro 19 vláken a u optického vlákna 62,5/125 $\mu$ m pro 19 vláken. U ostatních, čočka ozařovanou plochu moc nerozšířila. U optického vlákna 50/125 $\mu$ m a optického vlákna 62,5/125 $\mu$ m pro 7 vláken se nám plocha znatelně nerozšířila.

Jelikož se jedná o experimentální měření, a nemáme čím naše výsledky podložit ani vyvrátit, tak nemůžeme s jistotou říct, proč se některé typy optických vláken s čočkou, ozařovanou plochu rozšiřují a některé naopak redukují nebo zůstane ozařovaná plocha v podobném stavu jako bez čoček. Může se jednat o výrobní vadu, chybu při měření nebo optická vlákna 50/125 $\mu$ m a 62,5/125 $\mu$ m s čočkou opravdu při malém počtu vláken (7) ozařovanou plochu nerozšíří natolik, aby to bylo vidět.

Toto měření by se dalo určitě vylepšit zlepšením postupu výroby polydimetylsiloxanu tak, aby v něm nevznikaly bublinky, které by měly negativní vliv na měření. Dále při vkládání optických vláken do polystyrenového přípravku a jeho lepení, mít jistotu že všechna vlákna jsou zarovnána stejně, tudíž žádné nevyzařuje větší výkon než jiné. A nakonec by bylo dobré uvést, že by bylo užitečné změřit i jiné druhy optických vláken (například optická vlákna skokovou změnou indexu) při jiné vlnové délce, následně porovnat obě měření a pozorovat rozdíly.

## Použitá literatura

- [1] Kutálek, David. Bezvláknová optika včera a dnes [online]. Dostupné z: <http://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2003/xkutale1-optika.htm#odkazy-1>
- [2] ARNON, Shlomi. Visible light communication. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2015. ISBN 9781107061552.
- [3] Bc. Komárek, David. Vliv osob na komunikace ve viditelném světle (VLC): Diplomová práce, Praha, České vysoké učení technické, 2015, 66 stran, Vedoucí diplomové práce prof.ing Stanislav Zvánovec Ph.D
- [4] Vitasek Jan, Šiška Petr, Kepák Stanislav, Čubík Jakub, Pobořil Radek, Látal Jan. VLC Transmitter with Plastic Optical Fibers for indoor Free Space Optic Networks, Ostrava VŠB-TUO, 2014, 5 stran, Volume 12, number 6
- [5] Chung Ghiu Lee. Visible Light Communication, South Korea, Chosun University, 2011, 13 stran, DOI:10.5772/16034
- [6] Ke Wang, Ampalavanapillai Nirmalathas, Christina Lim and Efstratios Skafidas. High-speed duplex wireless communication system for indoor personal area networks, Australia, The University of Melbourne, 17. listopadu 2010, Vol. 18, No. 24 / OPTICS EXPRESS 25200
- [7] Madhusudhana Reddz Lebaka. Optimization of spot pattern in indoor diffused optical wireless systems, Kanpur, Indian Institute of technology, Červen 2006, 59stran, Kanpur-208016
- [8] Chaturi Singh, Joseph John, Y.N.Singh MIETE, K.K.Tripathi. A Review on Indoor Optical Wireless Systems, 2002, 36 stran
- [9] Bc. Wintr, Aleš. Měření parametrů optických čoček: Diplomová práce, Brno, Vysoké učení Technické, 2011, 82stran, Vedoucí práce Ing. Lucie Dordová, Ph.D.
- [10] Libich Jan. Základní kámen každého foťáku: Jak vzniká obraz v objektivu, 1.listopadu 2007 [online]. Dostupné z: [http://technet.idnes.cz/zakladni-kamen-kazdeho-fotaku-jak-vznika-obraz-v-objektivu-pan-/tec\\_foto.aspx?c=A071025\\_103506\\_tec\\_foto\\_jlb](http://technet.idnes.cz/zakladni-kamen-kazdeho-fotaku-jak-vznika-obraz-v-objektivu-pan-/tec_foto.aspx?c=A071025_103506_tec_foto_jlb)
- [11] NEWMAN, Jay. Physics of the life sciences. New York: Springer, c2008. ISBN 0387772588.
- [12] Jungnickel, Volker; Vucic, Jelena; Klaus-Dieter Langer. High speed Optical Wireless Communications. San Francisco, 19.březen, 2014, 58 stran, Tutorial Th1F.5
- [13] Variant Plus. Strukturovaný kabelážní systém - příručka, Třebíč, 38 stran
- [14] Hájek, Martin, Kucharski, Maciej. Vliv ohybů na útlum jednovidového optického vlákna - význam vlnové délky 1625nm pro měření optických tras, konference Optické komunikace 1999, [online]. Dostupné z: <http://www.mikrokom.eu/skoleni/pdf/vlnova-delka1625.pdf>
- [15] Československý časopis pro fyziku: Czechoslovak Journal of Physics. Praha: Ústřední ústav fyzikální, 1951-. ISSN 0009-0700.
- [16] Corning, Fiber-optic technology, 21.březen 2013 [online]. Dostupné z: [http://imedeia.uib-csic.es/~salvador/coms\\_optiques/addicional/Corning/fiber\\_optic.pdf](http://imedeia.uib-csic.es/~salvador/coms_optiques/addicional/Corning/fiber_optic.pdf)
- [17] Optical fibers, Canada, 28.ledna 2014, 6 stran [online]. Dostupné z:

[http://www.ozoptics.com/ALLNEW\\_PDF/DTS0135.pdf](http://www.ozoptics.com/ALLNEW_PDF/DTS0135.pdf)

- [18] Ing. Bubník, Lukáš, Ing. Klajbl, Jiří, Ing. Mazuch Petr, Optoelektrotechnika, Brno, Střední škola informatiky, poštovníctví a finančnictví, 30.4.2015, ISBN: 978-80-88058-20-5
- [19] Ing. Látal, Jan. Optické komunikace II: Měření numerické apertury NA optických vláken, Ostrava, VŠB-TUO, 2013, 52 stran, Číslo projektu: CZ.1.07/2.2.00/28.0322
- [20] Bc. Novák, Martin. Studium optických vlnovodů polydimetylsiloxanu: Diplomová práce, Ostrava, Vysoká škola Báňská, 2015, 85 stran, Vedoucí diplomové práce Prof. RNDr. Vladimír Vašínek CSc

## Seznam příloh

Příloha A: Absolutní průběhy optických vláken ze 34cm - uložené na DVD

Příloha B: Naměřené hodnoty - uložené na DVD

Příloha B: Relativní průběhy optických vláken ze 34cm - uložené na DVD

Adresářová struktura přiloženého DVD:

"DVD-ROM":\Příloha B\Absolutní průběhy optických vláken ze 34cm\

"DVD-ROM":\Příloha B\ Naměřené hodnoty\

"DVD-ROM":\Příloha C\Relativní průběhy optických vláken ze 34 cm\